



Naturalis

Repositorio Institucional

<http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar>

Universidad Nacional de La Plata

Facultad de Ciencias Naturales y Museo



Historia de incendios en bosques de Araucaria araucana [Molina] K. Koch de Argentina a través de un análisis dendroecológico

Mundo, Ignacio Alberto

Doctor en Ciencias Naturales

Dirección: Roig Juñent, Fidel A.

Co-dirección: Barrera, Marcelo D.

Facultad de Ciencias Naturales y Museo

2011

Acceso en:

<http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/id/20120126001038>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons
Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional



Naturalis

Repositorio Institucional
FCNyM - UNLP



Facultad de Ciencias Naturales y Museo
Universidad Nacional de La Plata

Historia de incendios en bosques de *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch de Argentina a través de un análisis dendroecológico

Tesis para optar al título de Doctor en Ciencias Naturales

Tesista: Ing. Ftal. Ignacio A. Mundo

Director: Dr. Fidel A. Roig Juñent

Codirector: Dr. Marcelo D. Barrera

2011

Resumen

El fuego ha sido un factor recurrente en el área de distribución de *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch. La presencia de carbón en registros polínicos y sedimentarios que cubren los últimos 44.000 años sugiere que los fuegos naturales han tenido un rol significativo en la modelización del paisaje. A pesar de las reconstrucciones de historia de incendios realizadas con diferentes especies arbóreas en el norte de Patagonia, en el caso de los bosques de *A. araucana* de Argentina no se han realizado estudios aplicando técnicas dendrocronológicas para reconstruir la frecuencia de fuegos de los últimos siglos.

El objetivo general de esta tesis es contribuir al conocimiento y entendimiento de la historia espacio-temporal de los incendios y su relación con la dinámica de los bosques de *A. araucana* en Argentina. Los objetivos particulares son 1) generar una red de cronologías de ancho de anillos de referencia para estudiar la relación clima-crecimiento de *A. araucana*, 2) reconstruir la historia de incendios en estos bosques a través de una red regional de cronologías de incendios sobre la base de la información aportada por cicatrices de fuego datadas por técnicas dendrocronológicas, 3) analizar la relación entre la ocurrencia de fuegos y la variabilidad climática, particularmente vinculada a eventos de El Niño-Oscilación Sur (ENSO), 4) determinar la incidencia del fuego en la dinámica de los bosques a través de la estructura de edades, el establecimiento de cohortes y el análisis de las tasas de crecimiento y 5) integrar las diferentes evidencias y resultados de incendios a fin de lograr una interpretación regional por fuentes múltiples sobre la historia de los fuegos en bosques de *A. araucana* de Argentina.

Los muestreos se realizaron en 10 sitios entre los 37° y 40° de latitud sur con el objetivo de cubrir la mayor variabilidad posible de casos dentro del rango de distribución de *A. araucana* en Argentina.

La gran similitud de las tendencias de crecimiento entre las 17 cronologías de ancho de anillos (10 desarrolladas en este estudio y 7 ya existentes) observada a través del análisis de correlación, permite afirmar que existe una señal común en toda la región. En otros

términos, se puede inferir que en el área de estudio existen condiciones climáticas determinantes que generaron esa similitud en los patrones de crecimiento. La cronología regional promedio, que incluyó en total 621 series, resultó en una expresión sintética del crecimiento de *A. araucana* en toda la región para el período 1140-2006. A través del análisis de cluster y de componentes principales (PCA), se distinguió la existencia de dos grupos de cronologías: uno que reunió a los sitios ubicados hacia el este (grupo estepario) y otro hacia el oeste (grupo méxico). Respecto a la respuesta al clima, la relación más fuerte se encontró con la temperatura del verano anterior. Por otra parte, se halló una relación positiva con las precipitaciones durante la estación de crecimiento. Este resultado fue concordante con una relación negativa con el índice de Oscilación Antártica (AAO). Además, se encontró una relación negativa entre las anomalías de la temperatura del mar en la zona Niño 3.4 de la primavera-verano previo con el crecimiento del grupo estepario.

El análisis de 246 secciones parciales con cicatrices de fuego permitió distinguir la importancia que han tenido los incendios como agentes de disturbio en los bosques de *A. araucana* en los últimos 460 años. El fuego más antiguo fue datado en 1441 en el sitio de Nahuel Mapi. Los intervalos medio de fuego compuesto variaron entre 5 y 16,3 años. En aquellos registros que cubrieron más de dos siglos, se encontró un aumento en la ocurrencia de incendios durante el siglo XIX. A nivel de sitio, y en escala regional, se observó una fuerte disminución en la ocurrencia de incendios desde comienzos del siglo XX. La creación del Parque Nacional Lanín (1937), los cambios en las pautas culturales y la política de control y lucha contra incendios desde 1930, quedaron plasmados en la historia de incendios de los diferentes sitios debido al notable aumento en los intervalos medios de fuego a partir de esa década. Al analizar todas las fechas de cicatrices de fuego a nivel regional en comparación con la cronología regional standard de *A. araucana* se observó que la ocurrencia de estos eventos se relacionó significativamente con años de bajo crecimiento. Sin embargo, las fechas de todos los incendios y de aquellos de gran magnitud no tuvieron una asociación clara con reconstrucciones de temperaturas de

verano y precipitaciones de noviembre-diciembre para la zona. La falta de una relación clara entre las fechas de incendios de cada sitio en comparación con el crecimiento de *A. araucana* a nivel regional, estaría indicando que la ocurrencia de estos disturbios respondería a factores antrópicos locales. A pesar de este hallazgo, se encontró una leve tendencia de correspondencia entre la ocurrencia de fuegos y las últimas etapas de eventos El Niño, cuando los veranos son cálidos y secos, y/o cuando el sistema ENSO está en transición a la fase La Niña.

Se analizó la estructura forestal, el establecimiento y las liberaciones en el crecimiento en siete de los rodales en donde se reconstruyeron sus respectivas historias de incendios. En los mismos se encontraron estructuras de cohortes múltiples, claras respuestas a la recurrencia de incendios. En términos regionales, el patrón de aumento tanto en el establecimiento como en el número de fuegos hasta 1840 estaría indicando cierto sinergismo entre ambos procesos. Sin embargo, superado cierto umbral de número de incendios y manteniéndose este número casi constante durante varias décadas, se produjo el descenso en el número de individuos que se establecieron. Las condiciones climáticas que favorecieron el crecimiento regional de la especie también condicionaron el establecimiento en la misma escala a pesar de la respectiva historia de incendios. Además, en función de la relación entre el número de incendios datados por décadas y el número de liberaciones, casi el 70% de los cambios en el crecimiento están asociados a fuegos. Dada la baja o nula densidad de plántulas hallada en la mayoría de los sitios y considerando la baja frecuencia de incendios en la última década, se cree que en la actualidad existen otros factores o disturbios que podrían estar limitando el establecimiento de *A. araucana*.

Abstract

Fire has been a frequent disturbance in the *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch. forests. The presence of charcoal in sedimentary pollen records covering the last 44,000 years suggest that natural fires have played a significant role in landscape modeling. Despite the existence of fire history reconstructions for forests dominated by different species in northern Patagonia, in the case of *A. araucana* in Argentina, no evidence of application of dendrochronological techniques for reconstructing fire history has been found.

The overall objective of this thesis is to contribute to the knowledge and the understanding of spatial and temporal variations in fire history and its relationship to *A. araucana* forest dynamics in Argentina. The specific objectives of this thesis are: 1) to generate a network of ring-width chronologies for the study of *A. araucana* growth and its climate response, 2) to reconstruct the fire history of these forests through a regional network of fire chronologies based on information provided by fire scars using dendrochronological techniques, 3) to determine the relationship between the occurrence of fires and climate variability, particularly related to El Niño-Southern Oscillation (ENSO) events, 4) to determine the incidence of fire as a forest modeler through the analysis of age structures, establishment of cohorts and growth rates and 5) to integrate the different evidences and results in order to achieve a regional multi-source interpretation of fire history in *A. araucana* forests of Argentina.

Sampling was conducted in 10 sites between 37 and 40° S along the *A. araucana* range of distribution in Argentina.

A correlation matrix of 17 ring-width chronologies (10 developed in this study and 7 from previous studies) showed significant correlations and great similarity between all records over the common interval 1676-1974. In other words, weather conditions are quite homogeneous throughout the area, which is expressed by similar growth patterns. The average regional chronology, which included a total of 621 series, resulted in a

synthetic growth expression throughout the region for the period 1140-2006. Although the entire region shares a common climate, cluster and principal component analyses clearly differentiated two main growth patterns related to the mesic- and dry sites at the western and eastern sectors, respectively. In terms of climate response, the strongest relationship was found for temperatures of the previous summer. Moreover, a positive relationship with rainfall during the current growing season was found. This result was consistent with a negative response to the Antarctic Oscillation index (AAO). On the other hand, there was a significant negative relationship between the previous spring-summer anomalies of Niño 3.4 sea surface temperatures and the radial growth of the xeric group.

The great role that fires played as a disturbance agent in *A. araucana* forests during the last 460 years was verified by the analysis of 246 fire-scarred partial cross-sections. The oldest fire was dated in 1441 in Nahuel Mapi. The composite mean fire intervals ranged between 5 and 16.3 years. In those records that covered over two centuries, an increase in fire occurrence during the nineteenth century was found. At site and regional level there was a sharp decrease in fire occurrence since the early twentieth century. The creation of the Lanín National Park (1937), changes in the human activities and wildfire suppression by fire-fighting policies since 1930, produced an important effect on fire histories due to the significant increase in mean fire intervals since that decade. Analyzing all fire scars dates at a regional level in comparison with the standard regional chronology, the occurrence of these events was significantly associated with years of low growth. However, all fire dates and those of high magnitude could not be clearly associated with reconstructions of summer temperatures and November-December rainfall for the area. At site level, the lack of a clear relationship between local fire dates and *A. araucana* regional growth, would indicate that the occurrence of these disturbances was consequence of local human factors. Despite these findings, there was a slight tendency of correspondence between the regional fire occurrence during the late

stages of El Niño events, when the summers are warm and dry, and/or when the ENSO system is in transition to La Niña phases.

Forest structure, establishment and growth releases were analyzed in seven of the ten stands where fire history was reconstructed. All of them showed multi-cohort structures which reflected the recurrence of fires in these sites. In regional terms, the association between the increasing establishment and the increasing number of fires until 1840 would indicate a synergism between these two processes. However, once the threshold number of fires was exceeded and keeping this number almost constant for several decades, there was a decrease in the number of individuals that were established. The climatic conditions that favored the regional growth of the species also conditioned the regional establishment despite the respective fire history. In addition, and based on the relationship between the number of fires dated by decades and the number of releases, nearly 70% of the changes in growth were associated with fire occurrence. Given the low seedling density and almost null recruitment found in most sites and considering the low frequency of fires in the last decades, there would be another factor or disturbance that is currently limiting the establishment of *A. araucana* seedlings.

Agradecimientos

Durante los últimos cuatro años y medio gran cantidad gente me ayudó muchísimo, de diferente manera, para la realización de esta tesis. A todos ellos les agradezco de corazón por su ayuda y apoyo en esta etapa.

En primer término deseo agradecer a mi familia, especialmente a mi padre Alberto y mi hermano Hernán. Ellos me estimularon y apoyaron en la decisión de comenzar una carrera científica tras la finalización de mi formación de grado. Les agradezco por su afecto y su incondicional ayuda. Siempre sentí que estuvieron conmigo a pesar de la distancia. A mi novia, Carina, quien durante este último año me brindó todo su amor, acompañándome en la difícil etapa de la escritura de tesis y entendiendo mis tiempos de abstracción y ausencia.

Esta tesis no se hubiese realizado sin la presencia de mi director Fidel Roig Juñent y mi codirector Marcelo Barrera. A ambos les agradezco por haber confiado en mí para realizar este trabajo, dándome la libertad para formarme, investigar y continuar mi actividad docente.

A Thomas Kitzberger, quien sin conocerme, aceptó ser mi codirector de beca de CONICET y me cedió muestras para ser analizadas en esta tesis. A Ricardo Villalba, por su completa generosidad y predisposición para ayudarme. En él no sólo conocí a un investigador de primer nivel, pero sobre todas las cosas, a una persona de una calidez humana inigualable. Siempre encontré abierta la puerta de su oficina para el diálogo, consultas y consejos.

A Quique Barrios y Alberto Ripalta, por su incondicional ayuda para la realización de las tareas de campo. A Alejandra Giantomasi, Lidio López, Sergio Piraino, Andrés Manceñido y Carolina Szymański por su gran ayuda en los muestreos.

A todos mis compañeros del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) del CCT CONICET, Mendoza, mi lugar de trabajo. En particular a los integrantes del Laboratorio de Dendrocronología por permitirme ser

parte de este genial grupo de trabajo. A mis compañeros de oficina (Juan Álvarez, Alejandro Casteller, Érica Cesca, Pablo Meglioli y Mariano Morales) por haberme “aguantado” durante estos cuatro años y medio que compartimos juntos. Siempre les estaré agradecido por su apoyo, paciencia y afecto durante las largas jornadas de trabajo. A Pierre Pitte, María Laura Suarez, Mariano Amoroso y Guillermina Massaccesi por su amistad y por compartir las largas sesiones de discusión y catarsis sobre nuestros respectivos trabajos de tesis.

Deseo especialmente agradecer a todos amigos y compañeros del LISEA (Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales – UNLP). Cada vez que regresé a La Plata, me hicieron sentir como en casa nuevamente. Siempre estuvieron al tanto de mis avances y disponibles en todo momento para ayudarme.

A todo el personal del Parque Nacional Lanín (Administración de Parques Nacionales) por haberme permitido realizar los muestreos de tesis y por su colaboración en las tareas de campo. Especialmente deseo agradecer la gran predisposición y ayuda de Javier Sanguinetti y especialmente a los guardaparques Adrián Daros y Julia Delgado de la seccional Ruka Choroy. A Leonardo Jakus, guardaparque del Parque Provincial Copahue. A Ernesto Maletti de Áreas Naturales Protegidas del Neuquén, Gustavo Lutz de la Dirección General de Bosques Provinciales, Daniel Bocos de la U.E.P. para el Ordenamiento Territorial de Bosque Nativos y Fernando López Espinosa de la Corporación Interestadual Pulmarí por las autorizaciones oficiales que permitieron la realización de los muestreos. A las comunidades mapuches Aigo (Ruka Choroy) y Ñorquinco, a José “Pasito” González de la Ea. Nahuel Mapi y Gastón Cordero del sitio Rahue, que gentilmente accedieron y se interesaron por la realización de estos estudios en sus respectivos campos.

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) que me otorgó una beca doctoral para realización de este trabajo. Al Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) por financiar todas las tareas de campo realizadas durante

esta tesis en el marco del proyecto IAI CRN II 005 “From landscape to ecosystem: across-scales functioning in changing environments” (PI: Dr. Guillermo Sarmiento).

A Brian Luckman (University of Western Ontario, Canadá) por su incondicional colaboración y predisposición para ayudarme en cualquier aspecto de esta tesis y de mi formación en general. Su gestión ante el IAI me permitió cubrir los gastos de traslado para asistir el curso de Dendroecology en el Tree-Ring Lab de Tucson, Arizona (University of Arizona) y proveer la mitad de los costos para participar del PAGES 1st Young Scientist Meeting en Corvallis, Oregon (Oregon State University). En ambas oportunidades, se presentaron avances de esta tesis. A Thomas Swetnam (University of Arizona, USA) por su atenta ayuda para resolver mis dudas y consultas sobre el programa EVENT y a Henri Grissino-Mayer (University of Tennessee, USA) por proveer el software FHX2 y por su predisposición para ayudarme en la instalación y funcionamiento de este programa.

Nuevamente, como hice al finalizar mi formación de grado, deseo agradecerle a la Universidad Nacional de La Plata por haberme formado y educado de manera gratuita durante todos estos años y por sentirme orgulloso de pertenecer a ella como alumno, egresado y docente.

Por último, quiero dedicar esta tesis a cuatro personas muy especiales para mí que hoy no están conmigo pero que me han apoyado y guiado durante mi vida y estudios. Gracias por sentirlos cerca mío.

Tabla de contenidos

Resumen	i
Abstract	iv
Agradecimientos	vii
Tabla de contenidos	x
1. Introducción general	1
1.1 Marco teórico	1
1.1.1 <i>El fuego como agente de disturbio</i>	1
1.1.2 <i>Características de la especie y bosques en estudio</i>	3
1.1.3 <i>El fuego como factor de disturbio en estos bosques</i>	8
1.1.4 <i>Las condiciones climáticas y la ocurrencia de incendios en el norte de Patagonia</i> ...	8
1.1.5 <i>Relación entre la actividad antrópica y el fuego en el norte de Patagonia</i>	12
1.2 Hipótesis	13
1.3 Objetivos	14
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	14
1.3.2 <i>Objetivos particulares</i>	14
1.4 Organización de la tesis	15
1.5 Bibliografía	15
2. Cronologías de ancho de anillos de <i>Araucaria araucana</i> y su relación con el clima	20
2.1 Introducción	20
2.2 Materiales y métodos	22
2.2.1 <i>Muestreos</i>	22
2.2.2 <i>Desarrollo de las cronologías</i>	26

2.2.3 Influencia climática en el crecimiento de <i>Araucaria</i>	29
2.3. Resultados	31
2.3.1 Diseño de anillos de <i>A. araucana</i>	31
2.3.2 Características de las cronologías y variaciones intrarregionales	32
2.3.3 Influencia climática en el crecimiento de <i>A. araucana</i>	41
2.4 Discusión.....	48
2.5 Bibliografía	52
 3. Cronologías de incendios en bosques de <i>Araucaria araucana</i> , influencia antrópica y relación con el clima	55
3.1 Introducción.....	55
3.2 Materiales y métodos	59
3.2.1 Muestreos	59
3.2.2 Desarrollo de las cronologías de incendios	63
3.2.3 Estadísticos de los datos de historia de incendios.....	66
3.2.4 Relación de los fuegos con variables climáticas	68
3.3. Resultados	69
3.3.1 Análisis de las cronologías a nivel de sitio	69
3.3.2 Análisis de las cronologías: patrones temporales.....	78
3.3.3 Relación de los fuegos con variables climáticas a nivel de sitio	85
3.4 Discusión.....	94
3.5 Bibliografía	101
 4. Estructura de rodales de <i>Araucaria araucana</i> afectados por incendios: clases diamétricas, establecimiento y patrones de crecimiento	105
4.1 Introducción.....	105
4.2. Materiales y métodos	108
4.2.1 Muestreos	108

4.2.2 Procesamiento de los tarugos.....	109
4.2.3 Análisis a nivel de parcela.....	114
4.2.4 Patrones de liberaciones en el crecimiento.....	115
4.3. Resultados	116
4.3.1 Características estructurales.....	116
4.3.2 Establecimiento a nivel de sitios y regional	122
4.3.3 Patrones de crecimiento	125
4.4. Discusión.....	133
4.5. Bibliografía	136
5. Discusión general.....	139
5.1 Contrastación de hipótesis	139
5.2 Síntesis esquemática.....	141
5.3 Interrogantes pendientes: investigaciones futuras.....	142
5.4 Bibliografía	145
APÉNDICES	146
Apéndice I: Fechas de incendios de las secciones parciales cofechadas.....	146
Apéndice II: Resumen de fechas de incendio por sitio	152
Apéndice III: Densidad de individuos (ind/ha) por clases diamétricas por sitio	158
Apéndice IV: Años de liberaciones por individuo analizado en cada sitio	159

Introducción general

CAPÍTULO I

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 *El fuego como agente de disturbio*

Un disturbio, en términos ecológicos, puede considerarse como cualquier evento relativamente discreto en el tiempo que causa desorden en la estructura de un ecosistema, comunidad o una población y cambia los recursos, la disponibilidad de sustrato o el ambiente físico (White y Pickett 1985). Estas modificaciones pueden expresarse en términos de cambios en la disponibilidad de recursos para una comunidad vegetal. Así, los disturbios modifican el balance de nutrientes, luz y espacio, y en consecuencia, afectan el crecimiento de las especies vegetales existentes y/o cambian la estructura y diversidad original.

La composición de los bosques está altamente influenciada por disturbios, ya que las alteraciones naturales o humanas ocurren con distinto grado en todas las masas boscosas y las especies arbóreas generalmente viven más años que el tiempo correspondiente al intervalo entre grandes perturbaciones. El desarrollo de un nuevo rodal no radica en el disturbio por sí mismo sino en las modificaciones causadas por la eliminación de plantas que previamente ocupaban el mismo espacio (Oliver y Larson 1996). El impacto que ejerce el disturbio en un determinado ambiente puede reflejarse en la presencia y abundancia relativa de las especies en una particular comunidad vegetal. Los agentes de disturbio naturales que afectan a los bosques son numerosos, entre los que se destacan el viento, las inundaciones, las tormentas de hielo, las avalanchas, los movimientos glaciares, los deslizamientos de laderas, la actividad volcánica, las plagas y el fuego (Oliver y Larson 1996).

Durante años se ha difundido una propaganda "anti-fuego" la cual considera a los incendios como fenómenos inherentemente negativos para los ecosistemas y producto de

las actividades humanas. Ha existido un error al no reconocer al fuego por lo que realmente es: un factor ecológico que es tan importante como otros disturbios en la determinación de la estructura y funcionamiento de muchos de los ecosistemas mundiales (Kimmins 1997).

El fuego ha tenido una gran importancia en términos ecológicos a lo largo de la historia de la Tierra, tal como se evidencia por la presencia de carbón en antiguos depósitos sedimentarios. Estos fuegos fueron el resultado de la actividad volcánica, la combustión espontánea o de la ocurrencia de rayos, siendo esta última la fuente de ignición natural más importante (Kimmins 1997). El uso de los incendios por parte del hombre se extendió por gran parte de la Tierra y existe evidencia que indica que los fuegos de origen antrópico han influido hasta en los bosques tropicales por miles de años, en la forma de corta y quema de reemplazo con fines agrícolas.

Los incendios influyen sobre la dinámica de los rodales forestales (Oliver y Larson 1996). La eliminación de la cobertura vegetal por el fuego tiene consecuencias en la erosión del suelo por efecto de las lluvias o deflación por viento. Los incendios también provocan muerte simultánea de un gran número de individuos adultos y la liberación de nutrientes, luz y espacio que genera las condiciones favorables para el reclutamiento de determinadas especies (Bond y van Wilgen 1996). En algunos bosques, el disturbio generado por los incendios disminuye la diversidad y/o productividad del sitio, mientras que en otros, los fuegos periódicos producen el efecto contrario (alta diversidad y productividad) (Kimmins 1997). Claramente, el rol ecológico de los fuegos varía de un tipo forestal a otro, de la misma manera que sus diferentes severidades resultan en distintos efectos ecológicos.

Dado que un fuego puede producir cambios ambientales radicales del ecosistema en forma muy rápida, la frecuencia de este tipo de eventos en períodos de varios siglos puede ser suficiente para mantener una condición diferente de lo que eventualmente podría desarrollarse en ausencia de incendios (Kimmins 1997). La frecuencia de incendios (lapso de tiempo entre dos eventos consecutivos) varía enormemente de una región a otra y de

un tipo de ecosistema a otro. La frecuencia sumada a la intensidad (energía liberada), estacionalidad (momento del año en el que ocurre), severidad (medida del impacto sobre el ecosistema) y tipo (de suelo, superficie o de copa) definen el régimen de fuegos de un sitio (Gill 1975, Whelan 1995, Bond y Keeley 2005).

En los últimos años ha crecido la preocupación por los efectos alcanzados por incendios en la Patagonia Argentina debido a la magnitud que han alcanzado estos disturbios. En esta región, entre 1999 y 2005, se quemaron más de 2,7 millones de hectáreas en 17 mil eventos de incendio (de Torres Curth et al. 2008). En 2006, 2007 y 2008 en la región de los Bosques Andino-Patagónicos ocurrieron 1.434, 1.838 y 2.185 incendios que afectaron 11.532,68, 6.888,13 y 25.230,19 ha respectivamente (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación 2007, 2008, 2009). Es por esta situación que las poblaciones locales y sus respectivos tomadores de decisiones, se encuentran ávidos por conocimiento que permita entender el régimen de estos disturbios y, de esta manera, elaborar sistemas de alerta y manejo de incendios. A pesar que se han realizado varios estudios dendrocronológicos que permitieron reconstruir la historia y frecuencia de incendios en diferentes bosques de Patagonia (Kitzberger 1994, Kitzberger et al. 1997, Veblen et al. 1999), aún se desconoce con claridad cómo ha sido la frecuencia histórica de este disturbio en los bosques de *Araucaria araucana* de Argentina.

1.1.2 Características de la especie y bosques en estudio

Araucaria araucana (Molina) K. Koch, conocida localmente como pehuén o pino, es una conífera siempreverde, endémica de los bosques subantárticos de Argentina y Chile. De porte extraordinario, ocasionalmente alcanza los 50 m de altura y 2 m de diámetro en el fuste (Alfonso 1941, Tortorelli 1942, Veblen y Delmastro 1976). Los árboles maduros poseen un tronco columnar con verticilos regulares de 5 a 9 ramas horizontales o levemente caídas, otorgándole su fisonomía característica. Debido a la caída natural de sus ramas, es posible hallar troncos libres hasta los 18-20 m de manera que la copa, la cual adopta una forma generalmente aparasolada, se encuentra restringida hacia al ápice del árbol (Fig. 1.1). Posee una corteza muy gruesa, hallándose árboles de 70 cm de diámetro

con cortezas de 14 cm de espesor, de color grisácea oscura y con grietas bastante pronunciadas que la dividen en placas más o menos poligonales (Tortorelli 1942).

A. araucana posee una distribución relativamente limitada cubriendo sólo tres grados de latitud entre los 37°20' y 40°20' S (Veblen et al. 1995). Esta distribución se divide en un área principal situada a ambos lados de la cordillera de los Andes y dos poblaciones disjuntas en la cordillera de Nahuelbuta en Chile (Montaldo 1974, Veblen y Delmastro 1976). En Argentina, se distribuye entre los 37°50' y 39°20' S, cubriendo una superficie aproximada de 280.000 ha (Fig. 1.2) (Rechene 2000). Se cree que la actual distribución restringida es el remanente de un área original más extensa que fue disminuida por el aprovechamiento forestal desde la colonización europea (Ricardi y Duek 1976, Veblen y Delmastro 1976).

Las poblaciones pertenecientes al área principal de los Andes se desarrollan desde su límite altitudinal en los 1500-1800 msnm descendiendo hasta los 900, con ocurrencia dispersa hasta los 600 m (Veblen 1982). La mayoría de los suelos de los bosques andinos de *A. araucana* derivan de capas recientes (post-glaciares) de depósitos de cenizas volcánicas (Casertano 1963). Esta especie también crece sobre suelos bien desarrollados derivados de rocas sedimentarias y metamórficas (Peralta 1980). Las precipitaciones anuales en esta zona fluctúan desde más de 4000 mm en la vertiente andina de Chile (Veblen 1982) hasta aproximadamente 1100 mm en el límite este de su distribución en Argentina (Burns 1991), con veranos secos y gran parte de su precipitación concentrada en invierno en forma de nieve.

Desde el punto de vista florístico y fitosociológico, Oberdorfer (1960) describió para *A. araucana* la asociación *Carici-Araucarietum* (que tiene como características principales y diferenciales a *A. araucana* y *Carex trichodes* var. *lateriflora*) y la ubica en la clase *Nothofagethea pumilionis antarticae* (Bosque caducifolio subantártico) perteneciente al círculo de la vegetación austro-chilense. Esta clasificación fue ampliada y actualizada posteriormente por Eskuche (1968) y Roig (1998), quienes dentro de la mencionada clase reconocieron el orden *Nothofagetalia pumilionis dombeyi* (bosques de *N. dombeyi*, *N.*

pumilio, de *A. chilensis* o *A. araucana* nordpatagónicos) y la alianza *Nothofagion pumilionis* (bosques y chaparrales de *N. pumilio* y *A. araucana*).

En su tipo forestal más común en los Andes, *A. araucana* forma un estrato superior abierto sobre otro inferior conformado principalmente por *Nothofagus pumilio* (Schmidt 1977, Veblen 1982). En Argentina, estos bosques están confinados ampliamente a los faldeos con exposición sur, mientras que los de aspecto norte están cubiertos por rodales puros de *A. araucana* (Burns 1991). Las asociaciones *A. araucana*-*N. dombeyi* no son muy comunes en Argentina a diferencia de Chile (Montaldo 1974) y están confinadas a ambientes riparios. En ambas márgenes de los Andes, se encuentra también a *N. antarctica* asociada de distintas maneras con *A. araucana*, especialmente en los límites altitudinales de la vegetación o cerca de bolsones de frío (Delmastro y Donoso 1980, Gajardo 1980, Donoso 1981). Cabe destacar la frecuente ocurrencia de *A. araucana* sobre densas poblaciones de *N. antarctica*, comunidades que constituyen posiblemente rodales post-fuego (Burns 1993). Hacia el este, en coincidencia con los menores valores de precipitación, aparecen bosques abiertos en asociación con *Austrocedrus chilensis*, *Lomatia hirsuta* y especies arbustivas típicas de la estepa (Burns 1991, Donoso-Zegers 1993). En estas situaciones, *A. araucana* aparece asociada a afloramientos rocosos y junto a cursos de agua. Los rodales ubicados en su límite este de distribución (70°35' W) están conformados por grupos aislados de árboles alcanzando hasta 600 msnm (Hueck 1978).

Luego de *Fitzroya cupressoides* y *Austrocedrus chilensis*, *A. araucana* es la tercera especie más longeva en los bosques andino patagónicos, habiéndose datado anillos de crecimiento en árboles vivos para el año 1140 (LaMarche et al. 1979). De otro modo, ejemplares que alcanzaron los 834 años de edad al momento de su muestreo en 1974. Algunos autores sugieren que podrían hallarse ejemplares de más de 1000 años (Tortorelli 1942, Montaldo 1974, Veblen et al. 1995), aunque estas apreciaciones no se han basado en estrictos controles dendrocronológicos.



Figura 1.1 Fotografía de un ejemplar de *A. araucana* adulto en Caviahue.

Los bosques de *A. araucana* en Argentina se encuentran protegidos por la ley provincial N° 1890 de 1991 de la Provincia del Neuquén y esta especie está incluida en el Apéndice I de la Convención sobre el Comercio Internacional de Especies de Flora y Fauna Silvestres en Peligro (CITES). Con anterioridad a la promulgación de la mencionada ley, entre los años 1949 y 1991, de acuerdo a estadísticas oficiales cuyos registros son incompletos, se han cortado por lo menos 270.000 m³ de madera en el área de distribución argentina de los bosques de *A. araucana* (Rovelotti y Bava 1993).

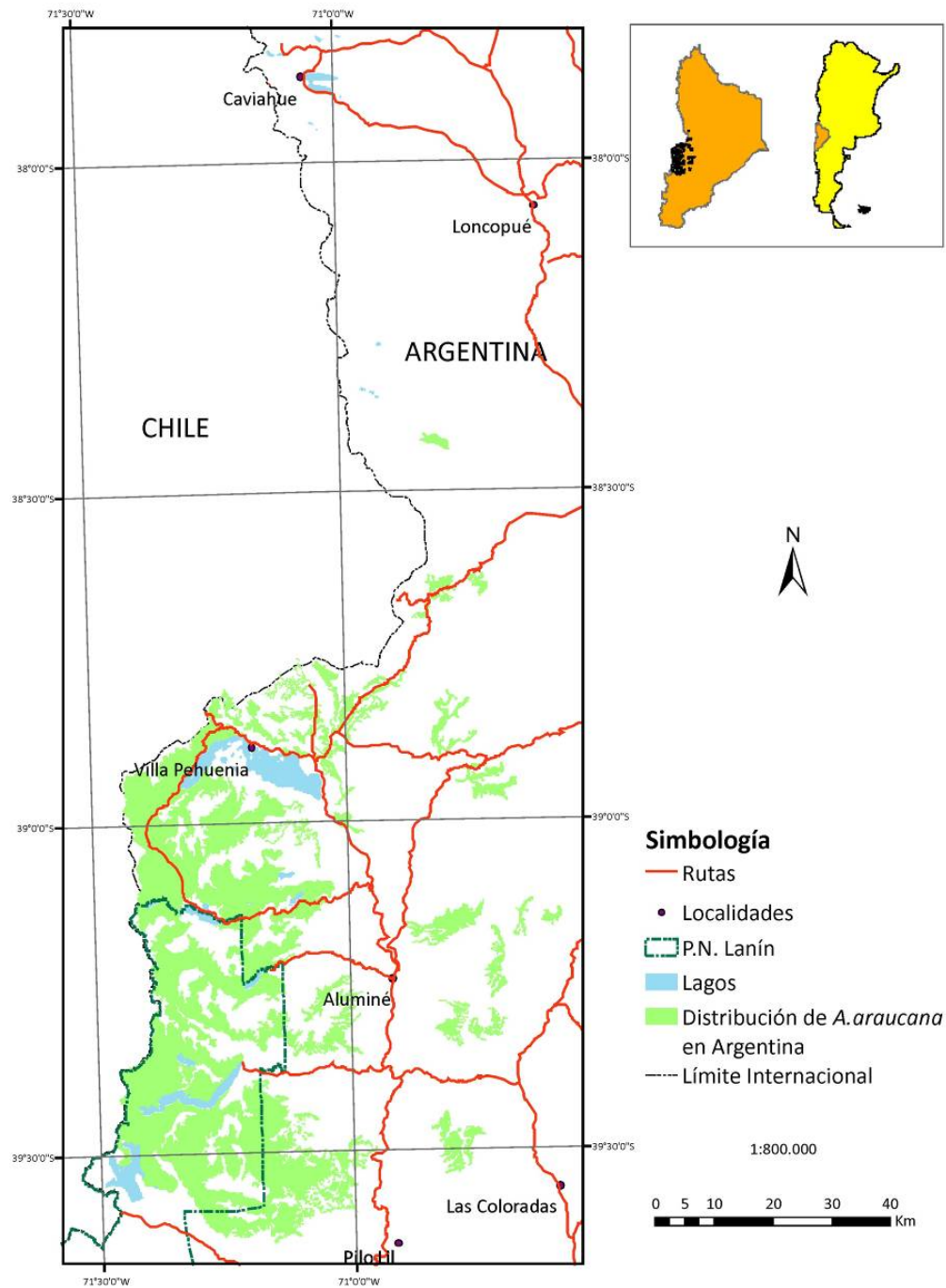


Figura 1.2 Distribución de *A. araucana* en Argentina.

1.1.3 *El fuego como factor de disturbio en estos bosques*

Los disturbios naturales que afectan las poblaciones andinas de *A. araucana* son el viento, el vulcanismo y el fuego (Veblen et al. 1995). El fuego ha sido un factor recurrente y antiguo en el área de distribución de *A. araucana*. La presencia de carbón en registros polínicos que cubren los últimos 44.000 años sugiere que los fuegos naturales tuvieron un rol significativo en la formación del paisaje previo al arribo de los pueblos nativos americanos hace 12.500 años (Heusser 1994). Whitlock et al. (2007), al examinar una red de testigos de carbón sedimentario a lo largo de Patagonia, indicaron que la actividad del fuego fue más grande que la presente en *ca.* 12.000 años BP (antes del presente) y creció y se extendió 9500 años BP. La actividad del fuego habría mermado y se habría convertido en espacialmente variable durante los últimos 6.000 años, tendencia que continúa hasta la actualidad. A pesar de no ser una especie serótina, *A. araucana* presenta características que le han permitido sobrevivir a los incendios (abaptación *sensu* Begon et al. 2006). Los árboles maduros poseen gruesas cortezas que los protegen de fuegos superficiales, brotes epicórmicos basales inducidos por heridas de fuego y yemas terminales protegidas que permiten continuar el crecimiento luego de incendios de copa (Tortorelli 1947, Montaldo 1974, Burns 1993). A través de estas características, los ejemplares maduros tienen mayores posibilidades de sobrevivir a determinados tipos de incendios, otorgándole una ventaja competitiva frente a las especies del género *Nothofagus*.

1.1.4 *Las condiciones climáticas y la ocurrencia de incendios en el norte de Patagonia*

Los mayores determinantes del clima en el norte de Patagonia son el Cinturón Ciclónico Antártico, la celda Pacífica de alta presión del sudeste y la Cordillera de los Andes que actúa como barrera orográfica a los vientos del Pacífico en sentido oeste-este (Prohaska 1976, Aceituno 1988, Villalba 1990).

Los Andes constituyen una barrera efectiva a los vientos del oeste o “westerlies” produciendo que las precipitaciones varíen de 4000 a 6000 mm en las laderas

occidentales (Chile) a 200 mm tan sólo 100 km al este de las crestas de los Andes en el lado Argentino (Almeyda y Sáez 1958).

En general, en la región de estudio, la temperatura media anual es cercana a los 10° C en las laderas con exposición oeste de los Andes, y variando entre 6° C en el límite altitudinal del bosque deciduo subantártico y 8°C en el ecotono del bosque *A. araucana* con la estepa al este de los Andes. En el área de distribución de *A. araucana* en Argentina, las temperaturas promedio de enero alcanzan valores entre 17 y 19° C y las del mes de julio los 7 a 8° C para la cuenca del río Collón-Curá (De Fina 1972, Heusser et al. 1988). La estacionalidad de la temperatura y la precipitación en la región está fuertemente controlada por las variaciones del anticiclón del sudeste del Pacífico. Durante los veranos, una celda de alta presión se posiciona a lo largo de la costa oeste de Chile entre los 40° y 45° de latitud sur, impidiendo el ingreso de masas de aire húmedo al continente. En cambio, en el invierno esta celda se desplaza hacia el norte (entre 35° y 40°S) posibilitando el ingreso de los “westerlies” que provocan altas precipitaciones en el continente (Taljaard 1972, Schwerdtfeger 1976, Pittock 1980, Aceituno 1988).

La variabilidad del fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENSO) tiene una fuerte influencia en los cambios en la intensidad y posición latitudinal del anticiclón del sudeste del Pacífico. Esta oscilación constituye un fenómeno acoplado entre el océano y la atmósfera con raíz en el Pacífico tropical y que se caracteriza por fluctuaciones irregulares entre fases cálidas (El Niño) y frías (La Niña) con una periodicidad que fluctúa entre los dos y siete años (Diaz y Markgraf 2000). Las anomalías de precipitación y temperatura asociadas a la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña son la fuente de mayor variabilidad interanual sobre la mayor parte de Sudamérica (Ropelewski y Jones 1987, Aceituno 1988, Garreaud et al. 2009). Durante eventos cálidos de El Niño (fase negativa de la Oscilación Sur), mayor cantidad de flujo de vientos “westerly” y precipitaciones ocurren en la costa Pacífica del centro-sur de Chile. Coincidente con esta fase de la Oscilación Sur, el anticiclón es más débil y se encuentra desplazado hacia el norte (Aceituno 1988). En contraposición, durante los eventos fríos de La Niña (fase positiva

de la Oscilación Sur), el anticiclón es más fuerte y está desplazado hacia el sur, bloqueando el ingreso de los “westerlies” y disminuyendo las precipitaciones de invierno y primavera. Se ha observado que los eventos El Niño están asociados a precipitaciones de primavera-invierno por encima de la media y con veranos cálidos. Por el contrario, años de eventos La Niña están asociados a lluvias de invierno-primavera por debajo de la media y a veranos frescos y lluviosos (Aceituno 1988, Kiladis y Díaz 1989, Rutllant y Fuenzalida 1991, Montecinos y Aceituno 2003).

La Oscilación Antártica (AAO), también conocida como Modo Anular del Hemisferio Sur (SAM), es el patrón dominante de variabilidad en la circulación troposférica al sur de 20°S y está caracterizada por anomalías de presiones de un signo centradas en la Antártida y opuestas en la banda circunglobal a los 40-50°S (Thompson y Wallace 2000). La fase positiva de la AAO está asociada con un decrecimiento en la presión superficial y en las alturas geopotenciales sobre la Antártida y un fortalecimiento y corrimiento hacia los polos de los “westerlies” (Garreaud et al. 2009). Condiciones opuestas prevalecen durante la fase negativa. En el caso particular de las precipitaciones del norte y centro de Patagonia, la relación con la AAO es opuesta (Aravena y Luckman 2009). Por lo tanto, durante fases positivas de la AAO se produce una disminución marcada en las precipitaciones de la zona.

A partir del registro de partes de incendios de cuatro Parques Nacionales de Patagonia (PN Lanín, Nahuel Huapi, Lago Puelo y Los Alerces), Kitzberger y Veblen (2002) observaron que la estación de incendios en la región coincide con los períodos de mayor déficit hídrico, el cual se extiende entre octubre y abril. Kitzberger et al. (1997), utilizando técnicas dendrocronológicas, pudieron reconstruir la historia de incendios en 10 sitios en un gradiente de bosques húmedos y situaciones de ecotono con la estepa. Al unir todos los tipos de vegetación, los años de incendios (n=74) y los años previos a éstos se caracterizaron por una disponibilidad de humedad de primavera-verano por debajo de la media para el período 1820-1974.

Los años de incendios sincronizados en el norte de Patagonia están asociados con valores de presión por debajo de la media en la península Antártica debido a la asociación de menos precipitación por una ausencia de bloqueo en altas latitudes (Veblen et al. 1999). Esta fuerte sincronización de los eventos en sitios dentro de un rango de 400 km de norte a sur indica una alta influencia climática en la ocurrencia de fuegos en escala regional.

El área de bosques quemados anualmente en la región está fuertemente asociada a variaciones en el índice de la Oscilación Sur (SOI; Ropelewski y Jones 1987) y la temperatura del mar (SST) en el este del Pacífico Ecuatorial (Kitzberger y Veblen 2002). A lo largo del período 1882 a 1989, los años de fuegos extensivos en el norte de Patagonia tuvieron tendencia a estar asociados con las etapas últimas de la fase positiva de la Oscilación Sur o La Niña, indicada con anomalías positivas del SOI y negativas del SST alrededor de los dos años anteriores de los eventos de incendios (Kitzberger y Veblen 2002).

A pesar que el patrón de asociación más común ubica a los años de mayor actividad de incendios durante las últimas etapas de eventos La Niña, grandes incendios forestales ocurrieron durante eventos El Niño (Veblen et al. 1999). Entre los 10 años de mayor ocurrencia de incendios entre 1740 y 1995, determinado por 21 sitios muestreados para cronologías de fuegos, seis años coincidieron con eventos moderados y muy fuertes de eventos El Niño (Quinn 1992, Ortlieb y Macharé 1993, Veblen et al. 1999)

Al igual que en los incendios en bosques de *A. chilensis* y *F. cupressoides* en Argentina, González (2002) realizó la primera reconstrucción dendrocronológica de incendios en bosques de *A. araucana* de Chile en el Parque Nacional Villarrica, IX Región de la Araucanía. Este estudio y otros posteriores (González et al. 2005, Quezada 2008) permitieron reconstruir la historia de incendios en los sectores de Quillelhue y Quetrupillán. González y Veblen (2006) observaron que los incendios en estos bosques se vieron favorecidos por uno o dos años previos con condiciones secas. Los años de gran actividad de incendios coinciden con veranos cálidos y secos posteriores a eventos El

Niño. Estos autores también afirmaron que los fuegos en esa zona están fuertemente relacionados con variaciones climáticas interanuales asociadas principalmente al efecto acoplado entre eventos ENSO y variaciones en la intensidad y posición latitudinal del anticiclón del sudeste del Pacífico.

1.1.5 Relación entre la actividad antrópica y el fuego en el norte de Patagonia

El carbón de incendios se encuentra presente en el registro sedimentario de los bosques de *A. araucana* de Argentina para los últimos 3000 años (Heusser et al. 1988). A lo largo del período histórico de observaciones, los incendios en la región han sido atribuidos al hombre a pesar que los relámpagos y el vulcanismo son fuentes conocidas de ignición (Tortorelli 1947, Bruno y Martín 1982). Algunos autores establecen que los fuegos en el norte de Patagonia eran iniciados por la población nativa antes de *ca.* 1900 y por los colonos europeos-argentinos desde 1890 a 1920 (Veblen y Lorenz 1988, Veblen et al. 1992). En el caso de Chile, González et al. (2005) y Quezada (2008), en sus reconstrucciones dendrocronológicas de incendios en bosques de *A. araucana* de Chile, observaron un aparente incremento en la ocurrencia de fuegos en el Parque Nacional Villarrica durante la colonización euro-chilena (post 1880) en comparación a los tiempos de ocupación de los pueblos originarios sudamericanos. A comienzos del siglo XX, Rothkugel, en su recorrido por los boques andino-patagónicos, observó gran cantidad de ejemplares de *A. araucana* con numerosas señales de fuegos antiguos y delimitó sobre cartas topográficas las áreas que él consideró quemadas (Rothkugel 1916). Los fuegos también fueron reportados en su asociación con el aprovechamiento forestal y recolección de semillas debido a las hogueras que encendían los “piñoneros”, arrieros o pastores para cocer sus alimentos al detenerse o pernoctar en el bosque (Tortorelli 1947, Montaldo 1974).

Por el contrario, Aagesen (2004) no concuerda con esta idea, independientemente si se tiene en cuenta a la población precolombina pehuenche o los araucanos de alrededor de 1800. Según este autor, prácticamente no hay investigación arqueológica que brinde información sobre el uso del fuego por los pueblos originarios, sumado a la escasez de

documentación escrita sobre los primeros sistemas de producción indígenas debido a la actividad misionera limitada en la zona. Por lo tanto, hay pocas evidencias en la literatura arqueológica y etnohistórica que indiquen que los pobladores colonizados hacían manejo del fuego en bosques de *A. araucana* (Aagesen 2004). Sin embargo, hay evidencia sólida que respalda la utilización del fuego para cazar en las llanuras patagónicas y a lo largo del ecotono bosque-estepa. Desde el exterminio de la población indígena del sur de América del Sur durante finales de 1800, que puso fin a la utilización del fuego para cazar, y el inicio de las políticas de supresión de incendios promulgadas a comienzos del siglo XX para extinguir incendios causados por los colonos pioneros, los rodales de *A. chilensis* en el ecotono tuvieron una leve expansión hacia la estepa patagónica (Veblen y Lorenz 1988, Veblen et al. 1999). Sin embargo, esta evidencia no revela si los habitantes indígenas de la región han utilizado alguna vez el fuego para manejar los bosques de *A. araucana* (Aagesen 2004). Uno de los primeros relatos escritos de la zona no contiene referencias al uso del fuego como herramienta para el manejo del recurso natural (de la Cruz 1835). Del mismo modo, no hay ninguna mención de la tecnología del fuego en dos relatos históricos completos del pueblo Pehuenche (Villalobos 1989, Torrejón y González 1993), ni tampoco sobre el uso del fuego en los Andes del sur analizado una revisión sobre los indígenas americanos del Sur (Wilson 1999).

Esta disparidad de opiniones genera la clara necesidad de una investigación para arrojar luz sobre el régimen histórico de incendios en bosques de *A. araucana* en Argentina.

1.2 HIPÓTESIS

1. La recurrencia de los incendios en bosques de *A. araucana* de Argentina aumentó en los últimos siglos debido a un cambio en las actividades de los pobladores (nativos y colonizadores).
2. El clima como factor determinante del contenido de humedad de la vegetación condiciona la ocurrencia de incendios en la zona.

3. El fuego, al modificar la estructura de los rodales, favorece la instalación de cohortes y genera cambios en las tasas de crecimiento radial.
4. De comprobarse la hipótesis anterior, los cambios no son similares en todos los sitios ya que dependen de los diferentes regímenes de incendio y de sus estructuras forestales consecuentes.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 *Objetivo general*

Contribuir al conocimiento y entendimiento de la historia espacio-temporal de los incendios y su relación con la dinámica de los bosques de *Araucaria araucana* en Argentina.

1.3.2 *Objetivos particulares*

1. Ampliar la red de cronologías de ancho de anillos de referencia para el estudio de la relación clima-crecimiento de *A. araucana*.
2. Reconstruir la historia de incendios en estos bosques a través de una red regional de cronologías de incendios sobre la base de la información aportada por cicatrices de fuego mediante el uso de técnicas dendrocronológicas.
3. Analizar la relación entre la ocurrencia de fuegos y la variabilidad climática, particularmente a episodios vinculados a El Niño-Oscilación Sur (ENSO).
4. Determinar la incidencia del fuego en la dinámica de los bosques a través de la estructura de edades, el establecimiento de cohortes y el análisis de las tasas de crecimiento.
5. Integrar las diferentes evidencias y resultados de incendios (cicatrices y cohortes) a fin de lograr una interpretación regional por fuentes múltiples sobre la historia de los fuegos en bosques de *A. araucana* de Argentina.

1.4 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La presente tesis se encuentra organizada en cinco capítulos. El Capítulo 1 contiene información introductoria sobre el fuego como disturbio en los bosques, la descripción de la especie y los bosques, el clima en Patagonia norte como factor determinante de estos disturbios sumado a la actividad antrópica. En el Capítulo 2 se presenta el desarrollo de una red de cronologías de ancho de anillos y su vinculación con el clima. En el Capítulo 3 se presentan las historias de incendios a nivel de sitio y regional y su relación con la actividad climática local y diferentes forzantes climáticos. En el Capítulo 4 se analiza la estructura de los rodales en función de la historia de incendios a través de las fechas de establecimiento y liberaciones en el crecimiento. Por último, en el Capítulo 5 se integran los resultados de los tres capítulos previos a modo de discusión general en función de las hipótesis planteadas, generándose nuevas preguntas a resolver y futuras líneas de investigación sobre el área temática.

1.5 BIBLIOGRAFÍA

- Aagesen, D. 2004. Burning monkey-puzzle: Native fire ecology and forest management in northern Patagonia. *Agriculture and Human Values* 21:233-242. doi: 10.1023/B:AHUM.0000029402.85972.6c.
- Aceituno, P. 1988. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: surface climate. *Monthly Weather Review* 106:505-524.
- Alfonso, J. 1941. El Pehuén, Araucaria o Pino del Neuquén en la Argentina. *Ingeniería Agronómica* 3:1-14.
- Almeyda, A., y S. Sáez. 1958. Recopilación de Datos Climáticos de Chile y Mapas Sinópticos Respectivos. Ministerio de Agricultura, Santiago de Chile.
- Aravena, J., y B. H. Luckman. 2009. Spatio-temporal rainfall patterns in Southern South America. *International Journal of Climatology* 29:2106-2120.
- Begon, M., C. Townsend, y J. Harper. 2006. *Ecology. From individuals to ecosystems*, 4^o edition. Blackwell Publishing, United Kingdom.
- Bond, W., y J. Keeley. 2005. Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in Ecology & Evolution* 20:387-394. doi: 10.1016/j.tree.2005.04.025.
- Bond, W., y B. van Wilgen. 1996. *Fire and plants*, 1^o edition. Chapman & Hall, London.
- Bruno, J., y G. Martín. 1982. Los incendios forestales en los Parques Nacionales. inédito, Administración de Parques Nacionales, Buenos Aires.

- Burns, B. 1991. The regeneration dynamics of *Araucaria araucana*. PhD Thesis, University of Colorado, Department of Geography, Boulder, Colorado, USA.
- Burns, B. 1993. Fire-induced dynamics of *Araucaria araucana*-*Nothofagus antarctica* forest in the Southern Andes. *Journal of Biogeography* 20:669-685.
- Casertano, L. 1963. General characteristics of active Andean volcanoes and a summary of their activities during centuries. *Seismological Society of America Bulletin* 53:1415-33.
- de la Cruz, L. 1835. Descripción de la naturaleza de los terrenos que se comprenden en los Andes, poseidos por los peguences, y los demás espacios hasta el río Chadileubu. Imprenta del Estado, Buenos Aires.
- De Fina, A. 1972. El clima de la región de los bosques Andino-Patagónicos. Páginas 35-58 *en* La región de los bosques andino-patagónicos, Sinopsis General. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Buenos Aires.
- Delmastro, R., y C. Donoso. 1980. Review of distribution, variation and utilization of gene resources of *Araucaria araucana* (Mol.) Koch in Chile. Aguas de São Pedro, SP.
- Diaz, H., y V. Markgraf (Eds.). 2000. El Niño and the Southern Oscillation: Multiscale Variability, Global and Regional Impacts. Cambridge University Press.
- Donoso, C. 1981. Tipos forestales de los bosques nativos de Chile. CONAF-PNUD-FAO, Santiago de Chile.
- Donoso-Zegers, C. 1993. Bosques templados de Chile y Argentina. Editorial Universitaria, Santiago de Chile.
- Eskuche, U. 1968. Fisonomía y sociología de los bosques de *Nothofagus dombeyi* en la región de Nahuel Huapi. *Vegetatio* XVI:192-204.
- Gajardo, R. 1980. Vegetación del bosque de *Araucaria araucana* (Mol.) K. Koch en la Cordillera de los Andes (Lonquimay, Prov. Malleco). Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Garreaud, R. D., M. Vuille, R. Compagnucci, y J. Marengo. 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281:180-195. doi: 10.1016/j.palaeo.2007.10.032.
- Gill, A. 1975. Fire and the Australian flora: a review. *Australian Forestry* 38:4-25.
- González, M. 2002. Fire history of *Araucaria-Nothofagus* forests in the Andean cordillera of south-central Chile. PhD Thesis, University of Colorado, Department of Geography, Boulder, Colorado, USA.
- González, M., y T. Veblen. 2006. Climatic influences on fire in *Araucaria araucana*-*Nothofagus* forests in the Andean cordillera of south-central Chile. *Écoscience* 13:342-350.
- González, M., T. Veblen, y J. Sibold. 2005. Fire history of *Araucaria-Nothofagus* forests in Villarrica National Park, Chile. *Journal of Biogeography* 32:1187-1202.
- Heusser, C. 1994. Paleoindians and fire during the late Quaternary in southern South America. *Revista Chilena de Historia Natural* 67:455-442.
- Heusser, C., J. Rabassa, y A. Brandani. 1988. Late-Holocene vegetation of the Andean

- Araucaria region, Province of Neuquén, Argentina. Mountain Research and Development:53-63.
- Hueck, K. 1978. Los bosques de Sudamérica. Ecología, composición e importancia económica. Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ).
- Kiladis, G., y H. Díaz. 1989. Global Climatic Anomalies with Extremes in the Southern Oscillation. *Journal of Climate* 2:1069-90.
- Kimmins, J. 1997. Forest ecology. Prentice Hall, New Jersey.
- Kitzberger, T. 1994. Fire regime variation along a northern Patagonian forest-steppe gradient: stand and landscape response. University of Colorado, Department of Geography, Boulder.
- Kitzberger, T., y T. Veblen. 2002. Influences of climate on fire in northern Patagonia, Argentina. Páginas 296-321 *en* T. Veblen, W. Baker, G. Montenegro, y T. W. Swetnam, editores. Fire and Climatic Changes in Temperate Ecosystems of the Western Americas. Springer-Verlag, New York.
- Kitzberger, T., T. Veblen, y R. Villalba. 1997. Climatic influences on fire regimes along a rain forest-to-xeric woodland gradient in northern Patagonia, Argentina. *Journal of Biogeography* 24:35-47.
- LaMarche, V., R. Holmes, P. Donwiddie, y L. Drew. 1979. Tree-ring chronologies of the southern hemisphere. University of Arizona.
- Montaldo, P. 1974. La bio-ecología de Araucaria araucana (Mol) Koch. *Boletín del Instituto Forestal Latino-Americano de Investigación y Capacitación* 46-48:3-55.
- Montecinos, A., y P. Aceituno. 2003. Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate* 16:281-296.
- Oberdorfer, E. 1960. Pflanzensoziologische Studien in Chile. Páginas 1-208 *en* R. Tüxen, editor. Flora et Vegetatio Mundi. J. Cramer, Weinheim.
- Oliver, C., y B. Larson. 1996. Forest Stand Dynamics. John Wiley & Sons, Inc.
- Ortlieb, L., y J. Macharé. 1993. Former El Niño events: records from western South America. *Global Planetary Change* 7:181-202.
- Peralta, M. 1980. Geomorfología, clima y suelos del tipo forestal Araucaria en Lonquimay. *Boletín Técnico* 55, Facultad de Ciencias Forestales - Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Pittock, A. 1980. Patterns of Climatic Variation in Argentina and Chile. I. Precipitation, 1931-1960. *Monthly Weather Review* 108:1347-61.
- Prohaska, F. 1976. The climate of Argentina, Paraguay, and Uruguay. Páginas 13-112 *en* W. Admiraal, editor. Climates of Central and South America - World Survey of Climatology. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Quezada, J. 2008. Historia de incendios en bosques de Araucaria araucana (Mol.) Koch del Parque Nacional Villarrica, a partir de anillos de crecimiento y registros orales. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia.
- Quinn, W. 1992. A study of Southern Oscillation-related climatic activity for A.D. 622-

- 1900 incorporating Nile River flood data. Páginas 119-149 *en* El Niño: Historical and paleoclimatic aspect of the Southern Oscillation. Cambridge University Press, Cambridge.
- Rechene, C. 2000. Los bosques de Araucaria araucana en Argentina. Estudios silvícolas. MSc, Universidad Técnica de Munich.
- Ricardi, M., y J. Duek. 1976. Trial area reconstruction of some tree communities of Chile using toponymics. Acta Botánica de Venezuela 11:405-11.
- Roig, F. 1998. La Vegetación de la Patagonia. Páginas 48-166 *en* Flora Patagónica. INTA, Buenos Aires.
- Ropelewski, C., y P. Jones. 1987. An extension of the Tahiti–Darwin Southern Oscillation Index. Monthly Weather Review 115:2161-65.
- Rothkugel, M. 1916. Los Bosques Patagónicos. Ministerio de Agricultura. Dirección de Agricultura y defensa agrícola, Buenos Aires.
- Rovelotti, J., y J. Bava. 1993. Cuartel Comarca Lago Moquehue. Diagnóstico de Situación. CIEFAP.
- Rutllant, J., y H. Fuenzalida. 1991. Synoptic aspects of the central Chile rainfall variability associated with the Southern Oscillation. International Journal of Climatology 11:63-76.
- Schmidt, H. 1977. Dinámica de un bosque virgen de araucaria-lenga (Chile). Bosque 2:3-11.
- Schwerdtfeger, W. 1976. Climates of Central and South America. Páginas 1-12 *en* W. Schwerdtfeger, editor. Climates of Central and South America - World Survey of Climatology. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 2007. Estadística de Incendios Forestales 2006. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Buenos Aires.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 2008. Estadística de Incendios Forestales 2007. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Buenos Aires.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 2009. Estadística de Incendios Forestales 2008. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Buenos Aires.
- Taljaard, J. 1972. Synoptic meteorology of the Southern Hemisphere. Meteorological Monographs 13:139-213.
- Thompson, D., y J. Wallace. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. Journal of Climate 13:1000-1016.
- Torrejón, F., y T. González. 1993. Los Pehuenches: una visión histórica. Páginas 71-125 *en* F. Faranda y O. Parra, editores. La región del Biobío, un espacio y una historia. Gráfica Andes, Santiago de Chile.
- de Torres Curth, M., L. Ghermandi, y G. Pfister. 2008. Los incendios en el noroeste de la Patagonia: su relación con las condiciones meteorológicas y la presión antrópica a lo largo de 20 años. Ecología Austral 18:153-167.

- Tortorelli, L. 1942. La explotación racional de los bosques de Araucaria de Neuquén. Su importancia económica. *Separata de Servir* VI:1-74.
- Tortorelli, L. 1947. Los incendios de bosques en la Argentina. Ministerio de Agricultura, Buenos Aires.
- Veblen, T. 1982. Regeneration patterns in Araucaria araucana forests in Chile. *Journal of Biogeography* 9:11-28.
- Veblen, T., B. Burns, T. Kitzberger, A. Lara, y R. Villalba. 1995. The ecology of the conifers of southern South America. *en* Ecology of the Southern Conifers. Melbourne University Press, Parkville.
- Veblen, T., y R. Delmastro. 1976. Los recursos genéticos de Araucaria araucana en Chile. *Información sobre Recursos Genéticos Forestales* 5:2-5.
- Veblen, T., T. Kitzberger, y A. Lara. 1992. Disturbance and forest dynamics along a transect from Andean rain forest to Patagonian shrubland. *Journal of Vegetation Science* 3:507-520.
- Veblen, T., T. Kitzberger, R. Villalba, y J. Donnegan. 1999. Fire history in Northern Patagonia: the roles of humans and climatic variation. *Ecological Monographs* 69:47-67.
- Veblen, T., y D. Lorenz. 1988. Recent vegetation changes along the forest/steppe ecotone of northern Patagonia. *Annals of the Association of American Geographers* 78:93-111.
- Villalba, R. 1990. Climatic Fluctuations in Northern Patagonia during the Last 1000 Years as Inferred from Tree-Ring Records. *Quaternary Research* 34:346-360.
- Villalobos, S. 1989. Los Pehuenches en la vida fronteriza. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile.
- Whelan, R. 1995. The ecology of fire. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- White, P., y S. Pickett. 1985. Natural disturbance and patch dynamics: an introduction. Páginas 3-13 *en* S. Pickett y P. White, editores. The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics. Academic Press, New York.
- Whitlock, C., P. Moreno, y P. Bartlein. 2007. Climatic controls of Holocene fire patterns in southern South America. *Quaternary Research* 68:28-36.
- Wilson, D. 1999. Indigenous South Americans of the Past and Present: An Ecological Perspective. Westview Press, Boulder, Colorado, USA.

Cronologías de ancho de anillos de *Araucaria araucana* y su relación con el clima

CAPÍTULO 2

2.1 INTRODUCCIÓN

Entre los años 1949 y 1950 un grupo dirigido por el profesor E. Schulman del Laboratory of Tree-Ring Research de la Universidad de Arizona, realizó los primeros muestreos dendrocronológicos en *Araucaria araucana* en el marco de una campaña de reconocimiento en Patagonia. En función de las muestras de barreno que obtuvieron y al conteo de anillos en algunos rollizos en un aserradero de Curacautín (Chile), enfatizaron el gran potencial que tendría la especie para estudios dendroclimáticos principalmente justificado por su gran longevidad (cercana a los 1000 años) y por el tipo particular de ambiente en el que se desarrolla (Schulman 1956). Sin embargo, se destacó la dificultad que presentaba la especie para el fácil reconocimiento de sus anillos por sus propiedades anatómicas.

Recién en la década de los 70' (1973-1978) y nuevamente bajo iniciativa de un grupo dendrocronólogos de la Universidad de Arizona, en este caso dirigidos por Dr. V. LaMarche Jr y en colaboración con investigadores argentinos del IANIGLA se retomaron los muestreos en bosques de *A. araucana*. En esas campañas se exploraron 17 sitios, confeccionándose las primeras 12 cronologías de la especie (LaMarche et al. 1979). En el informe final del proyecto solamente se presentaron las cronologías con sus respectivos estadísticos sin realizar comparaciones con variables climáticas. Con parte de esas series dendrocronológicas, se realizó la primer reconstrucción de caudales de ríos de la zona (Holmes et al. 1979). A finales de la década de los 80 se publicó la primer reconstrucción de temperaturas de verano entre 1500-1974 utilizando ocho de las cronologías desarrolladas por LaMarche et al. en 1979 (Villalba et al. 1989).

Finalmente a mediados de la década de los 90', Villalba (1995) presentó la primera relación entre el crecimiento de *A. araucana* y las temperaturas y precipitaciones de la zona. En esa

oportunidad, el análisis de cuatro cronologías de Argentina junto a dos de Chile, permitió distinguir una relación positiva con las temperaturas del verano previo a través de funciones de correlación y respuesta de un componente principal de estas series (Fritts 1976, Blasing et al. 1984). En el caso de las precipitaciones, la relación con el crecimiento radial de *A. araucana* no resultó en un patrón claro.

Piraino et al. (2007) desarrollaron una nueva cronología en el Paso Tromen y encontraron la misma relación con el clima hallada en trabajos previos. Sin embargo, al incluir esta nueva serie con los registros de LaMarche et al. (1979) no pudieron agrupar con claridad las diferentes cronologías de acuerdo a su patrón de similitud en relación a algún tipo de causante, ya sea de posición geográfica o de otro tipo.

A pesar de estos antecedentes aún no se conoce cómo es el patrón general de crecimiento radial de la especie a lo largo de su distribución en Argentina. Además, considerando que *A. araucana* se desarrolla en nuestro país desde la cordillera de los Andes, con precipitaciones cercanas a los 2.000 mm.año⁻¹ hasta el contacto con la estepa patagónica con valores menores a los 500 mm.año⁻¹, sería esperable encontrar una respuesta diferencial del crecimiento a las variables climáticas analizadas en este gradiente.

El conocimiento de los factores climáticos que determinan el crecimiento radial de las especies permite utilizar sus series dendrocronológicas como variables “proxies” para inferir cómo fueron las condiciones climáticas en momentos determinados de su historia ambiental. Dado que uno de los objetivos en esta tesis es tratar de distinguir el efecto climático de otro tipo de influencias en el desarrollo de incendios forestales en bosques de *A. araucana* durante los últimos siglos, resulta de suma necesidad explorar qué factores gobiernan el crecimiento de la especie, ya que las cronologías de ancho de anillos de crecimiento de *A. araucana* serán utilizadas como series proxies del clima pasado. Esto último se debe a que los registros meteorológicos instrumentales son de calidad variable, extensión acotada a las últimas décadas y distribución espacial irregular, lo que limita el análisis comparativo. Además, estas cronologías de ancho de anillos de sitios no perturbados son esenciales como patrones de referencia para el

correcto fechado de las cicatrices de fuego y de tarugos provenientes de rodales afectados por incendios.

Por lo tanto, los objetivos de este capítulo son 1) ampliar la red de cronologías de referencia de *A. araucana* y analizar sus patrones de crecimiento en su área de distribución en Argentina, 2) establecer qué variables climáticas (temperatura y precipitación) y en qué momento del año son condicionantes del crecimiento radial, y por último 3) establecer algún tipo de relación entre la variabilidad en el crecimiento radial con forzantes climáticos a nivel regional.

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1 Muestreos

Los muestreos de tarugos de *A. araucana* fueron realizados en las estaciones de verano entre marzo de 2005 y diciembre de 2008. Las colecciones se realizaron en 10 sitios entre los 37 y 40° de latitud sur (Tabla 2.1 y Fig. 2.1 y 2.2). Las mediciones de anchos de anillos correspondientes a siete cronologías adicionales de *A. araucana* de LaMarche et al. (1979) y Villalba et al. (1989) fueron descargadas del International Tree-Ring Data Bank del Programa de Paleoclimatología de la NOAA (<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering.html>). Por lo tanto, en este análisis se consideraron 17 cronologías de anchos de anillos de *A. araucana*.

La toma de muestras se realizó en rodales de *A. araucana* sobre sustrato rocoso en los faldeos de los Andes Patagónicos (Fig. 2.2). Los sitios de muestreo se seleccionaron sobre sustratos estables sin evidencias de incendios forestales ni de otro tipo de disturbio. A excepción de Nahuel Mapi, en donde se realizó una corta de protección de baja intensidad muy cercana al sitio de muestreo en el año 2005, ninguno de los sitios evidenció signos de aprovechamientos forestales recientes.

En cada sitio de muestreo, se extrajeron entre dos y cuatro tarugos de 30 árboles (a una altura aproximada de 1.1 m). Este número de muestras es requerido para lograr un mejor resultado en la datación cruzada o cofechado de las mismas y fortalecer, de esta manera, los resultados del análisis estadístico (Fritts 1976).

Tabla 2.1 Características de los sitios de las cronologías de ancho de anillos.

Sitio	ID	Latitud S	Longitud W	Altitud (msnm)	Pend. (°)	Exp.	Temp. Media anual (°C)	PP anual (mm)	Nº de árboles/ muestras	Fuente
Caviahue LaMarche	CVV	37°50'54,2"	71°01'44,8"	1674	7	SE (126°)	7,5	1035	18/39	LaMarche et al 1979 - ITRDB
Caviahue	CAV	37°51'54,2"	71°04'08,9"	1695	17	N (10°)	7	1046	43/85	Este estudio
Chenque Pehuén	CHP	38°06'00,0"	70°51'00,0"	1616	8	NE (54°)	7,8	865	24/67	LaMarche et al 1979 - ITRDB
Pino Hachado	HAC	38°40'15,1"	70°50'14,6"	1622	33	N (324°)	7	712	30/60	Este estudio
Paso del Arco	PAR	38°49'32,4"	71°04'49,2"	1697	19	E (74°)	7	896	30/60	Este estudio
Primeros Pinos	PRP	38°53'00,0"	70°37'00,0"	1613	12	NE (37°)	7,7	474	11/28	LaMarche et al 1979 - ITRDB
Lonco Luan	LAL	38°59'00,0"	71°03'00,0"	1164	8	W (290°)	9,1	827	19/53	LaMarche et al 1979 - ITRDB
Remeco	REM	39°05'42,5"	71°19'14,5"	1217	23	W (289°)	8,4	1098	30/60	Este estudio
Norquínco	NOR	39°09'08,1"	71°14'56,6"	1142	13	N (347°)	7,8	961	30/60	Este estudio
Ea. Pulmarí	PUL	39°09'14,1"*	71°13'36,1"*	1181	11	N (338°)	7,1	913	15/28	ITRDB
Rucachoroi	RUC	39°13'39,3"	71°09'46,0"	1317	9	E (88°)	7,3	811	30/60	Este estudio
Pinalada Redonda	PIN	39°18'26,9"	71°17'22,6"	1119	16	N (348°)	8,4	955	30/60	Este estudio
Rahue	RAH	39°23'39,5"	70°47'43,6"	1455	4	SW (231°)	7,2	500	30/60	Este estudio
Ea. Nahuel Mapi	MAP	39°32'46,8"	71°02'37,0"	1531	5	SE (116°)	6,8	639	30/60	Este estudio
Paso Tromen	PTR	39°36'48,6"	71°25'37,2"	1222	15	N (340°)	7	1007	22/22	Villalba et al 1989 - ITRDB
Lago Tromen	TRO	39°36'54,7"	71°20'47,0"	965	2	E (71°)	8,7	969	18/67	LaMarche et al 1979 - ITRDB
Lanín	LAN	39°36'58,5"	71°26'33,4"	1565	16	N (12°)	5,5	985	30/60	Este estudio

ID: Código de identificación de la cronología; msnm: metros sobre el nivel del mar; Pend.: pendiente; Exp.: exposición o aspecto en coordenadas geográficas (azimuth); Temp.: temperatura; PP: precipitación; ITRDB: International Tree-ring Data Bank

Fuente de Altitud: modelo de elevación del terreno SRTM (resolución 90 m)

Fuente de Temp. media anual y PP anual: Worldclim Global Climate Data (grillado con resolución de 1 km y remuestreado a 90 m a través del método del vecino más cercano)

Pendiente y Exposición: derivadas del SRTM

* Villalba com.pers.

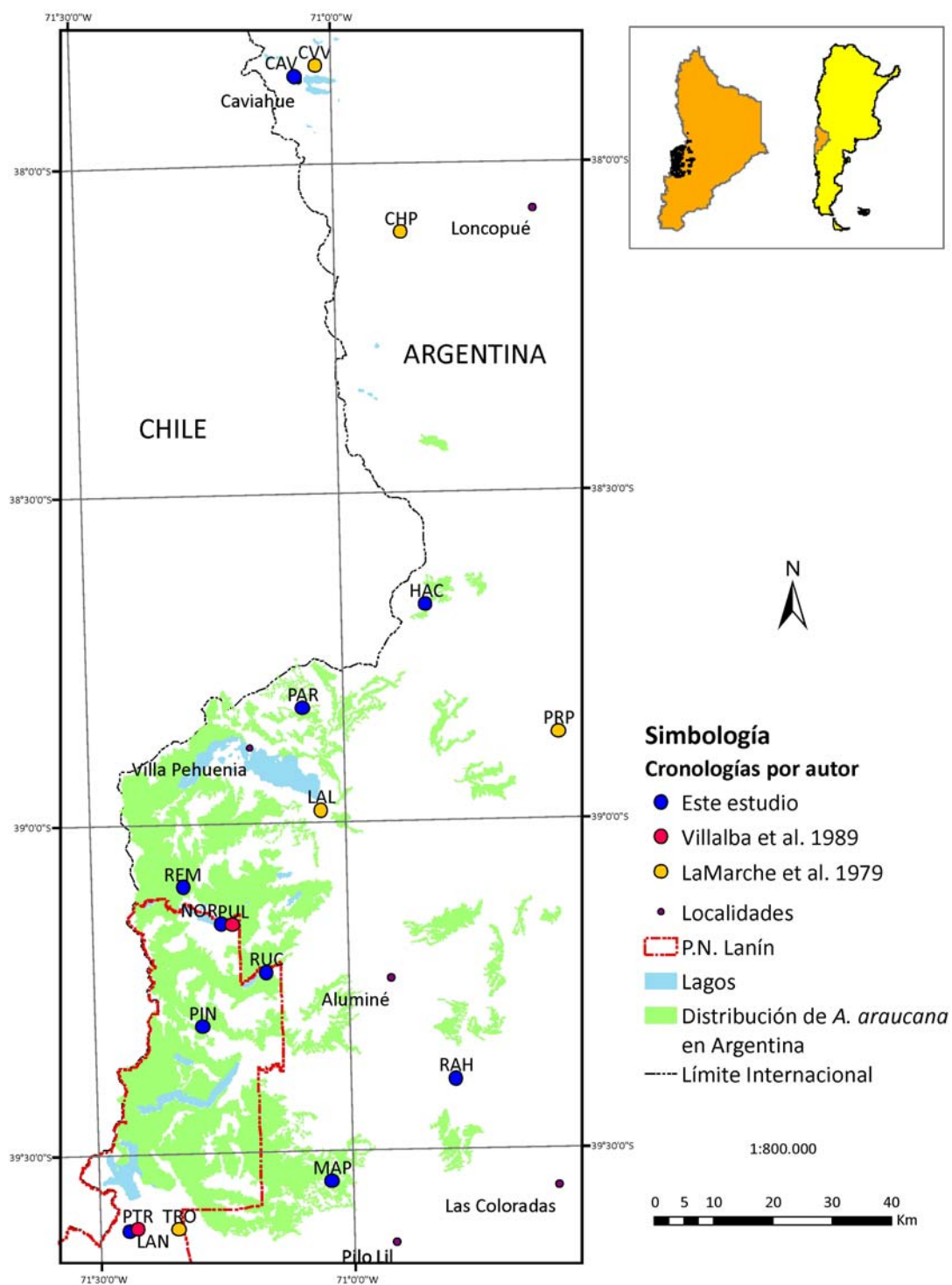


Figura 2.1 Distribución espacial de los sitios de las cronologías de ancho de anillos en el área de distribución de *A. araucana* en Argentina (ver Tabla 2.1 por el detalle de los códigos).

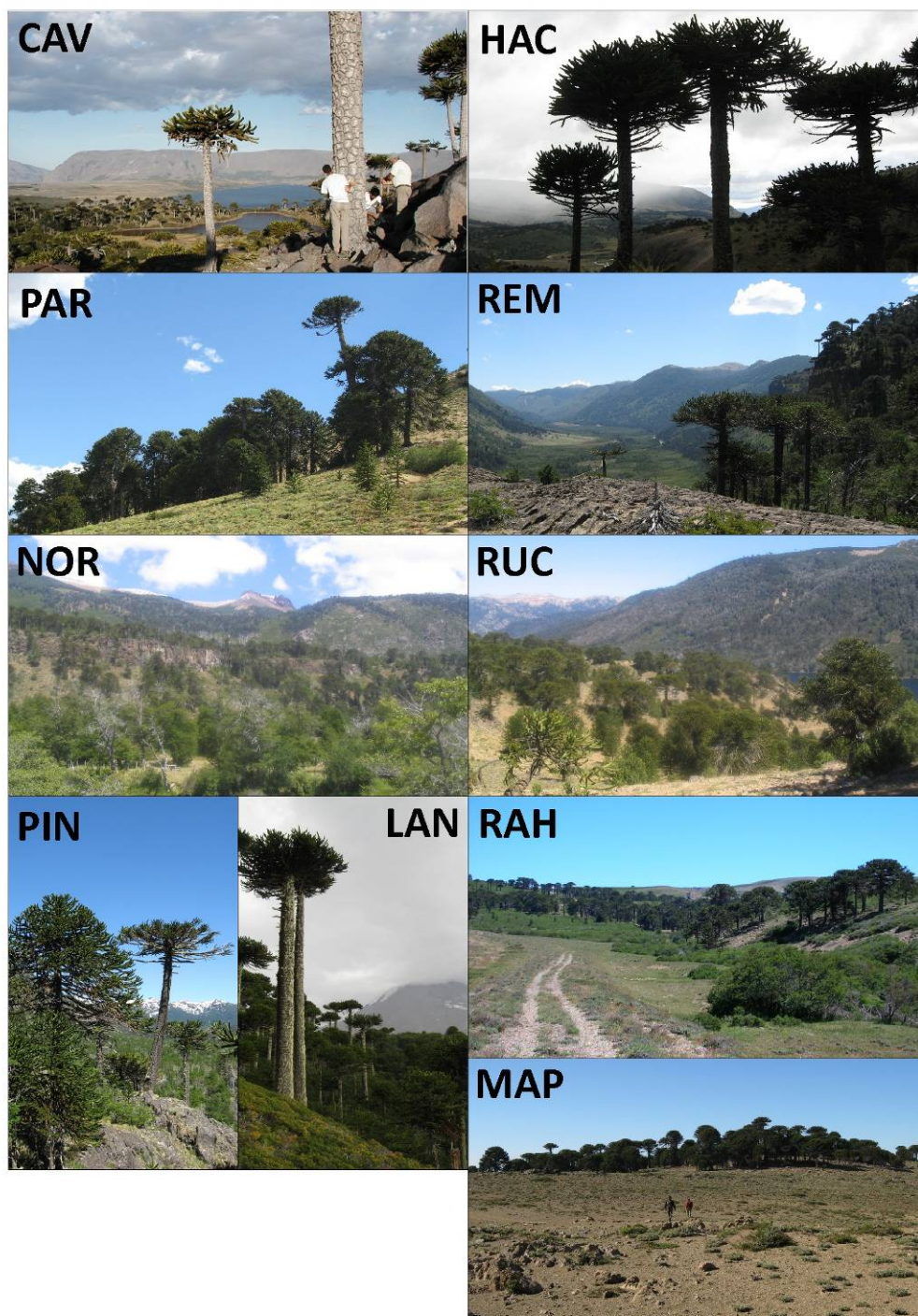


Figura 2.2 Fotografía de los sitios de las cronologías de ancho de anillos en el área de distribución de *A. araucana* en Argentina desarrolladas en este estudio (ver Tabla 2.1 por el detalle de los códigos).

2.2.2 Desarrollo de las cronologías

Las cronologías tanto de la nueva colección como las correspondientes a las mediciones de LaMarche et al. (1979) y de Villalba et al. (1989) fueron confeccionadas siguiendo los procedimientos estándar en dendrocronología (Fritts 1976, Cook et al. 1990).

Las muestras fueron montadas, pulidas y fechadas visualmente siguiendo los criterios de Stokes y Smiley (1968). Para ello, cada tarugo fue transportado desde el campo en sorbetes plásticos y luego pegado con cola vinílica sobre regletas de madera acanaladas, procedimiento que se realizó en el laboratorio. Una vez secos, se procedió a lijarlos con granulometría ascendente de 80 a 400, obteniéndose superficies lisas y sin imperfecciones para su visualización bajo lupa binocular (50 x). Los anillos anuales fueron asignados al año de comienzo de la formación del leño siguiendo la convención para el hemisferio sur de Schulman (1956).

Las muestras fueron cofechadas visualmente mediante el método de la lista (Yamaguchi 1991), técnica que permite la sincronización del fechado de diferentes muestras mediante el listado de los anillos más angostos y su posterior comparación. Este procedimiento permitió un reconocimiento rápido del patrón de ancho de anillos. Los anchos de anillos fueron medidos en una tableta Velmex UniSlide conectada a un contador digital Metronics Quick-Chek QC-10V con una precisión de 0,001 mm. Las muestras fueron finalmente depositadas en el repositorio del Departamento de Dendrocronología e Historia Ambiental del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) del CCT CONICET Mendoza.

La calidad del fechado de las series (presencia de anillos falsos y/o anillos ausentes) se verificó mediante el programa COFECHA (Holmes 1983). Este software remueve la baja frecuencia de las series, maximiza la variabilidad interanual y compara simultáneamente las curvas de ancho de anillos con ventanas de años superpuestas. De esta manera, cuando se observa baja correlación en períodos de años de una serie en relación a una cronología maestra (promedio del conjunto de muestras generado sin la serie en comparación), se infieren problemas de fechado debido a la probable presencia de anillos falsos, anillos ausentes o falta del patrón de anillos esperable en esa porción de tiempo en función del promedio de las otras series. El programa también tiene la capacidad de establecer la cantidad de años que debe

desplazarse una porción de una muestra, o “ventana” de anillos, para su mejor correlación con la cronología maestra.

Una vez verificada la calidad del fechado, cada serie de ancho de anillos fue estandarizada y luego promediada para generar una cronología del sitio (Fritts 1976, Cook et al. 1990). La estandarización involucra el ajuste de una curva o una recta a la serie de ancho de anillos y la generación de índices anuales calculados como el cociente del valor observado y el esperado por el ajuste para cada año. Este procedimiento reduce la varianza entre series y transforma los anchos de anillos en valores de índices adimensionales. La estandarización también remueve o reduce la influencia de variaciones del crecimiento no sincrónicas entre el grupo de muestras y la tendencia biológica del crecimiento de cada árbol determinada por la variabilidad temporal del ancho de los anillos (por ej., árboles más longevos tienden a tener anillos más angostos que individuos más jóvenes) (Fritts 1976).

Las cronologías, en sus versiones standard y residual, fueron confeccionadas con el programa ARSTAN 4.0c (Cook 1985). Las mediciones de anchos de anillos fueron estandarizadas mediante el empleo de curvas exponenciales negativas y regresiones lineales. Las cronologías residuales fueron producidas de la misma manera que las versiones standard, aunque en este caso, se confeccionaron a partir de los residuos del modelado autoregresivo de las series estandarizadas.

Las bondades de las cronologías fueron evaluadas a través de diferentes estadísticos: la sensibilidad media (una medida de la variabilidad anual de los anillos de crecimiento), la correlación media entre todas las series (RBAR), la señal expresada de la población (EPS) y la auto-correlación de primer orden (una medida de asociación entre el crecimiento de un año determinado y su correspondiente predecesor).

El RBAR es una medida de la varianza común entre series, independiente del número de radios medidos (Wigley et al. 1984). El EPS mide el grado de bondad de la cronología en comparación con una cronología de población basada en un número infinito de árboles (Wigley et al. 1984). Al igual que el RBAR, el rango del EPS es de 0 a 1 (desde la discordancia hasta una total concordancia con la cronología poblacional). El umbral de aceptación del EPS

considerada por Wigley et al. (1984) es de 0,85. Tanto el RBAR como el EPS fueron computados utilizando ventanas móviles de 50 años con solapamientos de 25.

Con el objetivo de evaluar el grado de similitud entre cronologías y poder agruparlas, se utilizaron análisis de correlación, y técnicas multivariadas como Análisis de Cluster y de Componentes Principales (PCA) (Cooley y Lohnes 1971).

El Análisis de Cluster, también conocido como Análisis de Conglomerados, es una técnica estadística multivariada cuya finalidad es agrupar un conjunto de objetos en grupos (cluster en inglés), en este caso cronologías de ancho de anillos, de forma que los perfiles de los objetos en un mismo grupo sean muy similares entre sí (cohesión interna del grupo) y se maximice la diferencia entre clusters distintos (aislamiento externo del grupo) (Anderberg 1973). Un dendrograma es una representación gráfica en forma de árbol que resume el proceso de agrupación en un análisis cluster. Los objetos similares se conectan mediante enlaces cuya posición en el diagrama está determinada por el nivel de similitud/disimilitud entre los objetos. En este estudio, se utilizó como índice de disimilitud la distancia euclidiana normalizada (raíz cuadrada media) y el método de Ward como criterio de agregación.

El objetivo del PCA es reducir la dimensionalidad de un grupo de variables pero reteniendo la máxima variabilidad en términos de la estructura de varianza-covarianza. En otros términos, el PCA trata de explicar la estructura de varianza-covarianza de un set de datos utilizando un nuevo sistema de coordenadas que es menor en dimensión que el número original de variables. Cada eje en el nuevo sistema transformado es conocido como componente principal dando origen al nombre de la técnica. En el caso de los análisis dendrocronológicos, las series de índices son consideradas como variables mientras que los años de crecimiento representan los casos (García-González et al. 1997).

Estas técnicas multivariadas fueron exitosamente utilizadas en dendrocronología para el ordenamiento o clasificación de árboles, sitios de cronologías o funciones de respuesta, principalmente a través de PCA aplicados a series individuales (Peters et al. 1981) o cronologías (Villalba y Veblen 1997) o por medio de análisis de clúster sobre series de anchos de anillos (García-González et al. 1997, Savva et al. 2006).

2.2.3 Influencia climática en el crecimiento de Araucaria

Con el objetivo de determinar la influencia de los factores climáticos en el crecimiento de *Araucaria*, se emplearon funciones de correlación (Blasing et al. 1984). Las funciones de correlación se calcularon entre las cronologías residuales y los valores mensuales de las diferentes variables climáticas analizadas en períodos de 19 meses entre octubre del año anterior al comienzo del crecimiento y abril del final de la estación de crecimiento.

Se crearon dos registros climáticos regionales mensuales (temperatura media y precipitación total) promediando los desvíos de los registros correspondientes a las estaciones meteorológicas de la zona (Tabla 2.2 y Fig. 2.3). En primer término, se calcularon los desvíos de las series para cada estación (diferencia entre el valor mensual y la media histórica del mes, luego dividido por el desvío estándar) y luego se promediaron entre todos los sitios. Como consecuencia del uso de desvíos normalizados, cada estación, independiente de sus valores particulares de temperatura y precipitación, tuvo el mismo peso en el registro del promedio regional. En el registro regional de precipitación se incluyeron las siguientes estaciones próximas al área de estudio: Flor del Lago (Chile), Ea. Mamuil Malal, Ea. Collun-co, San Martín de los Andes y aeropuerto de Bariloche. En el caso de la temperatura, se incluyeron las series de Buta Ranquil, Las Lajas, Ea. Collun-co y del aeropuerto de Bariloche.

El índice de sequía de Palmer (Palmer drought severity index - PDSI, Palmer (1965)) fue desarrollado como un índice que mide la duración e intensidad de los patrones de sequías de largo plazo. Se basa en el concepto de demanda-suministro de agua, teniendo en cuenta el déficit entre la precipitación real y aquella necesaria para mantener las condiciones de humedad climática o normal. El procedimiento de cálculo requiere como datos de entrada, además de la precipitación mensual, los valores o estimaciones de evapotranspiración potencial y la cantidad de agua útil del suelo. El PDSI tiene valores dentro de un rango de -10 (seco) y +10 (húmedo) y al ser una medida estandarizada, permite la comparación entre diferentes regiones y momentos. En el caso particular de este estudio, se utilizó la serie de PDSI mensual para el período 1902 - 2005 del punto 38°45'S y 71°15'W obtenida de la grilla de 2,5° x 2,5° de Dai et al. (2004).

Tabla 2.2 Registros meteorológicos utilizados para la confección de las series climáticas regionales y su posterior comparación con el crecimiento radial de *A. araucana*.

Estación	Latitud S	Longitud W	Elevación (msnm)	Período	Parámetro ^a	Responsable ^b
Buta Ranquil	37°00'	70°07'	1250	1966-2005	tmp	SSRH
Las Lajas	38°31'	70°22'	713	1916-1973	tmp	SMN
Flor del lago	39°20'	72°01'	300	1931-1961	pp	KNMI
Ea Mamuil Malal	39°39'	71°14'	990	1935-1998	pp	HIDRONOR
Ea Collun-co	39°58'	71°12'	875	1912-1989	pp, tmp	HIDRONOR
San Martín de los Andes	40°10'	71°22'	650	1936-1975	pp	HIDRONOR
Bariloche	41°09'	71°16'	825	1951-2009	pp, tmp	SMN

^a pp, precipitación mensual; tmp, temperatura media mensual

^b SSRH, Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación; SMN, Servicio Meteorológico Nacional; HIDRONOR, Hidroeléctrica Norpatagónica S.A.; KNMI, Royal Netherlands Meteorological Institute

Con el objetivo de analizar la relación entre ENSO y el crecimiento de *A. araucana*, se emplearon datos de anomalías de temperatura del mar (SST) para la región Niño 3.4 (5° N/5° S, 170°/120° W) de Trenberth y Stepaniak (2001) actualizados según la página web del programa Global and Climate Dynamics del National Centre for Atmospheric Research de USA (http://www.cgd.ucar.edu/cas/catalog/climind/TNI_N34/index.html). En el caso particular de la Oscilación Antártica (AAO), existen diversos índices para caracterizarla. En este análisis, se utilizó el componente principal de las anomalías de la altura geodinámica de 850 hPa al sur de los 20°S para el período 1948-2002 (Thompson y Wallace 2000). Los patrones de correlación espacial entre la altura geopotencial a 850 mb o hPa y el crecimiento radial de *A. araucana* para el período 1948-2006 fueron realizados con los datos disponibles en la página web de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA página web: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/>).

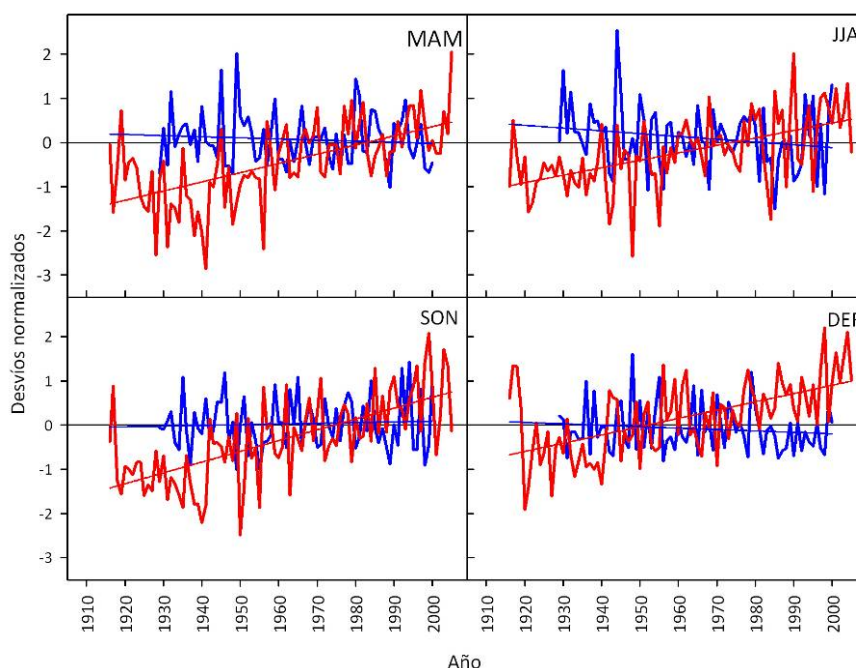


Figura 2.3 Registros regionales promedio de desvíos normalizados de temperatura media (curvas rojas) y precipitación (curvas azules) por trimestres. Se presentan rectas de ajuste para cada registro. MAM: marzo-abril-mayo; JJA: junio-julio-agosto; SON: septiembre-octubre-noviembre; DEF: diciembre-enero-febrero.

2.3. RESULTADOS

2.3.1 *Diseño de anillos de A. araucana*

En todas las muestras procesadas para este estudio se comprobó que la madera de *A. araucana* es de color blanco-amarillento con leve tonalidad ocrácea sin diferencia pronunciada entre albura y duramen. En el corte transversal, se comprobó que el leño es homogéneo debido a la dominancia de las traqueidas como elemento conductor del xilema. Los anillos son visibles debido a la compresión radial y engrosamiento de las paredes de las traqueidas del leño tardío en comparación con las del leño temprano. Dentro del anillo la transición entre estos dos leños es del tipo gradual (Fig 2.4, Tortorelli 1956). Tal como fuera observado por E. Schulman en 1956, en algunos casos la coloración del leño tardío no es pronunciada, y su ancho es menor al del leño temprano. Esto dificulta la determinación precisa del límite del anillo en individuos

jóvenes de rápido crecimiento y lo hace prácticamente imposible en las últimas porciones de árboles muy longevos. Este último hecho produjo que muchas series tuvieran que ser recortadas en su porción final debido a la gran compactación de sus anillos.

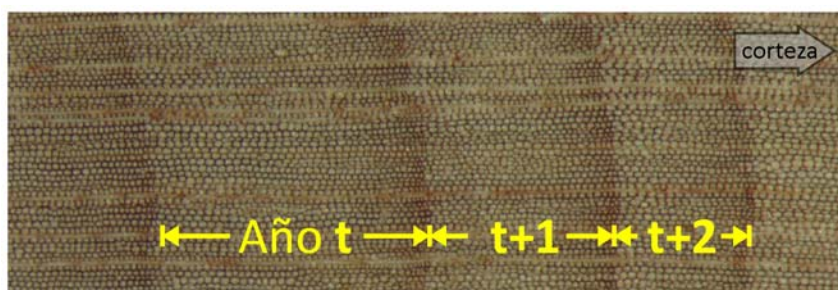


Figura 2.4 Fotografía macroscópica (40x) en la que se observa el detalle de los anillos de *A. araucana*.

2.3.2 Características de las cronologías y variaciones intrarregionales

En la Tabla 2.3 se presentan los estadísticos descriptivos de las cronologías analizadas. El incremento medio anual (IMA) tuvo valores extremos de 0,569 y 1,323 mm en Chenque Pehuén y Rahue respectivamente. Por otra parte, la sensibilidad media varió entre 0,172 y 0,232 (en Pino Hachado y Ea. Pulmarí respectivamente), lo que indica que la variabilidad en el ancho del anillo es media. Una sensibilidad mayor a 0,3 se considera alta (Shiyatov 1986). La cronología de Primeros Pinos resultó la más extensa, cubriendo el período 1140-1974 (Tabla 2.3 y Fig. 2.5).

Cabe destacar los altos valores de autocorrelación de primer orden observados en todas las cronologías. Los RBAR medio se presentan en la Tabla 2.3, mientras sus valores móviles como así también los del EPS se visualizan en la Fig. 2.6. Los RBAR medio tuvieron valores entre 0,188 y 0,328, los que podrían considerarse medios a bajos. Tal como puede observarse a través de los RBAR móviles (Fig. 2.6), su comportamiento no fue constante en el tiempo. Con respecto a los valores de EPS, las cronologías más extensas presentaron en los inicios de las mismas algunos períodos con valores inferiores al umbral de 0,85 (Fig 2.6). Este fenómeno se debe principalmente a la poca cantidad de muestras en esos períodos.

Los análisis de correlación, cluster y PCA fueron realizados con las cronologías residuales en lugar de las standard debido a la alta autocorrelación presente en todas las series (Tabla 2.3).

En todos estos análisis se compararon las cronologías para el período común 1676-1974 (299 años).

En el análisis de correlaciones entre todas las series residuales se encontró que todas las combinaciones de asociación son positivas y significativas (Tabla 2.4). Cabe destacar los altos valores de correlación que se encontraron en estas combinaciones. Merece la pena enfatizar que la cronología Nahuel Mapi tuvo el más alto valor promedio de correlación con todas las otras series.

Tabla 2.3 Estadísticos descriptivos de las cronologías *A. araucana* utilizadas en este estudio (ver Tabla 2.1 por el detalle de los códigos).

Código	Período	Datos de medición		Cronologías standard	
		IMA ^a (mm)	Sensibilidad Media	RBAR medio ^b	Autocorrelación
CAV	1550-2003	0,646	0,195	0,208	0,563
CVV	1444-1974	0,858	0,192	0,248	0,699
CHP	1246-1974	0,569	0,205	0,241	0,642
HAC	1424-2006	0,810	0,172	0,208	0,606
PAR	1264-2006	0,773	0,229	0,299	0,750
PRP	1140-1974	0,603	0,228	0,237	0,706
LAL	1306-1974	0,903	0,220	0,211	0,623
PUL	1589-1989	0,865	0,232	0,328	0,502
REM	1450-2006	0,852	0,195	0,188	0,691
NOR	1676-2006	0,939	0,187	0,215	0,726
RUC	1647-2006	0,913	0,194	0,232	0,645
PIN	1606-2006	1,018	0,230	0,215	0,591
RAH	1591-2006	1,323	0,184	0,223	0,601
MAP	1525-2006	1,001	0,194	0,209	0,569
TRO	1617-2006	1,180	0,205	0,250	0,602
PTR	1385-1983	0,883	0,204	0,226	0,537
LAN	1291-2006	0,584	0,222	0,256	0,566

^a IMA, Incremento Medio Anual

^b RBAR medio, índice de correlación promedio entre series ponderado por el número de muestras

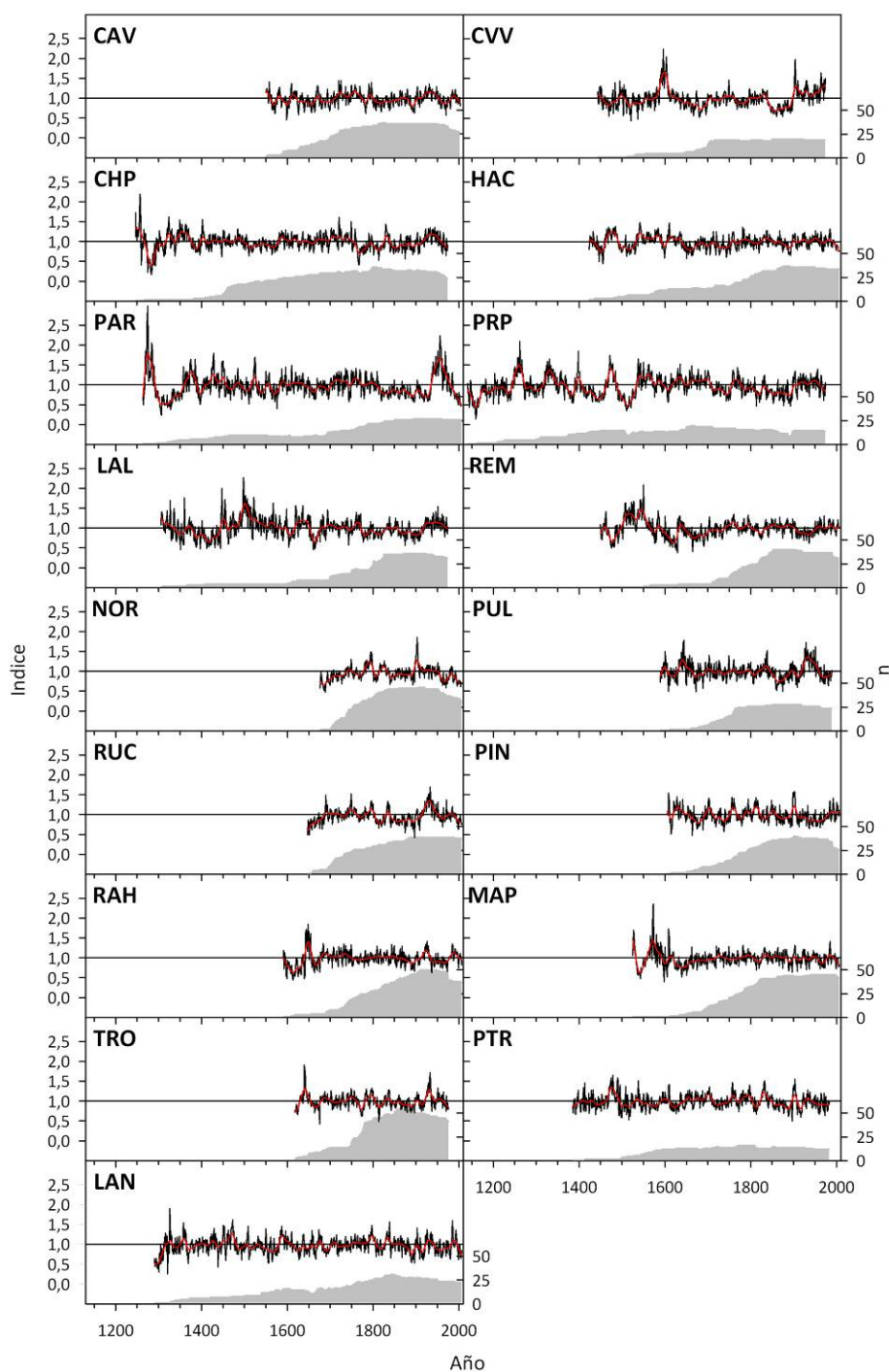


Figura 2.5 Cronologías standard de *A. araucana*. En rojo aparecen superpuestas curvas spline de 25 años. En la parte inferior se muestran los números de muestras como áreas grises. (ver Tabla 2.1 por el detalle de los códigos)

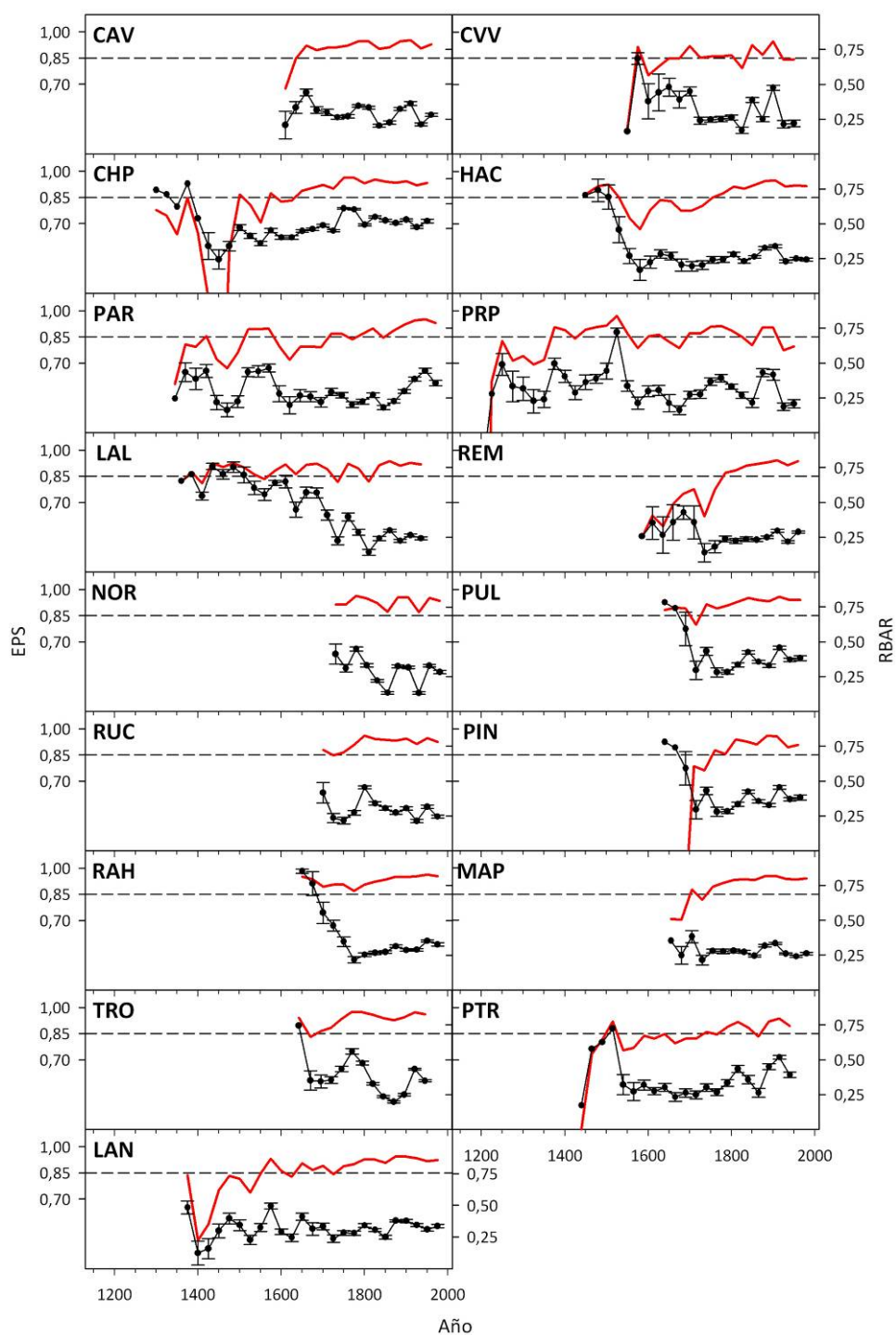


Figura 2.6 Estadísticos EPS (curvas rojas) y RBAR móviles (\pm error standard) de las cronologías standard de *A. araucana*. (ver Tabla 2.1 por el detalle de los códigos)

Tabla 2.4 Matriz de correlación entre las cronologías residuales de *A. araucana* para el período común 1676-1974 (299 años) ordenadas de norte a sur (ver códigos y ubicación en Tabla 2.1 y Figura 2.1).

	CAV	CVV	CHP	HAC	PAR	PRP	LAL	REM	NOR	PUL	RUC	PIN	RAH	MAP	TRO	PTR	LAN
CAV		0,710	0,704	0,726	0,579	0,650	0,557	0,572	0,581	0,550	0,599	0,506	0,618	0,696	0,426	0,563	0,673
CVV			0,753	0,672	0,529	0,632	0,503	0,544	0,604	0,508	0,626	0,493	0,514	0,635	0,527	0,542	0,594
CHP				0,721	0,567	0,709	0,538	0,541	0,544	0,556	0,639	0,474	0,576	0,699	0,516	0,577	0,637
HAC					0,650	0,705	0,604	0,619	0,611	0,583	0,654	0,561	0,709	0,786	0,510	0,597	0,696
PAR						0,552	0,531	0,496	0,420	0,455	0,463	0,451	0,580	0,624	0,385	0,469	0,528
PRP							0,583	0,532	0,495	0,505	0,561	0,518	0,610	0,722	0,497	0,632	0,618
LAL								0,632	0,615	0,706	0,633	0,620	0,578	0,647	0,547	0,443	0,483
REM									0,675	0,663	0,690	0,698	0,536	0,699	0,590	0,554	0,649
NOR										0,625	0,712	0,688	0,542	0,701	0,628	0,527	0,575
PUL											0,752	0,683	0,561	0,609	0,599	0,489	0,575
RUC												0,660	0,585	0,670	0,683	0,569	0,631
PIN													0,533	0,642	0,652	0,571	0,589
RAH														0,741	0,463	0,526	0,590
MAP															0,590	0,670	0,754
TRO																0,537	0,547
PTR																	0,760
LAN																	

$r \leq 0,556$ (percentil 33%)
 $0,556 < r < 0,632$ (percentiles 33% y 66%)
 $r \geq 0,632$ (percentil 66%)

Todas las correlaciones son significativas para un nivel $\alpha = 0,05$ ($r = 0,113$). En la parte inferior se presenta la escala de colores para los rangos de correlación en función de los percentiles del 33y 66 %.

El análisis de cluster permitió reconocer, en primer nivel, dos grandes grupos de cronologías (Fig. 2.7). En el PCA, los componentes (PC) 1, 2 y 3 explicaron el 73,8% de la varianza acumulada (Fig 2.8). A partir de la proyección de las variables en el nuevo sistema de tres ejes, se observaron tendencias opuestas en los mismos dos grupos de cronologías diferenciados principalmente a través del PC2. Las cronologías de Cavihue-LaMarche, Cavihue, Chenque Pehuén, Pino Hachado, Paso del Arco, Primeros Pinos, Rahue, Ea. Nahuel Mapi, Paso Tromen y Lanín se ubicaron en la porción negativa del PC2. Por el contrario, las series de Lonco Luan, Remeco, Ñorquinco, Ea Pulmarí, Rucachoroi, Pinalada Redonda y Lago Tromen tuvieron valores positivos en el PC2. Cabe aclarar que en el PCA las cronologías corresponden a las variables y los casos a los 299 índices de crecimiento correspondientes al período común 1676-1974.

Con el objetivo de hallar la explicación a la separación de estos dos grupos de cronologías, las coordenadas de las mismas sobre los nuevos ejes 1,2 y 3 se compararon con datos geográficos de cada sitio a través de un análisis de correlación (Tabla 2.5). En el caso de la variable exposición la misma se desglosó en exposición norte (coseno de la exposición en

radianes) y este (seno de la exposición en radianes). Comparando las variables geográficas entre sí, se observó que la altitud de los sitios se correlacionó positiva y significativamente con la latitud y la longitud de los mismos, pero negativamente con la temperatura media anual. Dicho de otro modo, los sitios de mayor altitud considerados en este estudio se ubican al norte y al este, siendo sus temperaturas medias anuales las más bajas. Por otra parte, la relación negativa entre las precipitaciones y la ubicación longitudinal de los sitios, demostró que las cronologías del oeste reciben mayor cantidad de agua de lluvias. El PC2 se correlacionó negativamente con la latitud, la longitud y la altitud. De esta manera, las cronologías que presentaron valores positivos sobre el PC2 son aquellas ubicadas hacia el sur, oeste y con menor altitud. Recordando que la altitud y la longitud se correlacionaron negativamente con la temperatura media anual y las precipitaciones respectivamente, estas cronologías corresponden a los sitios más cálidos y más húmedos.

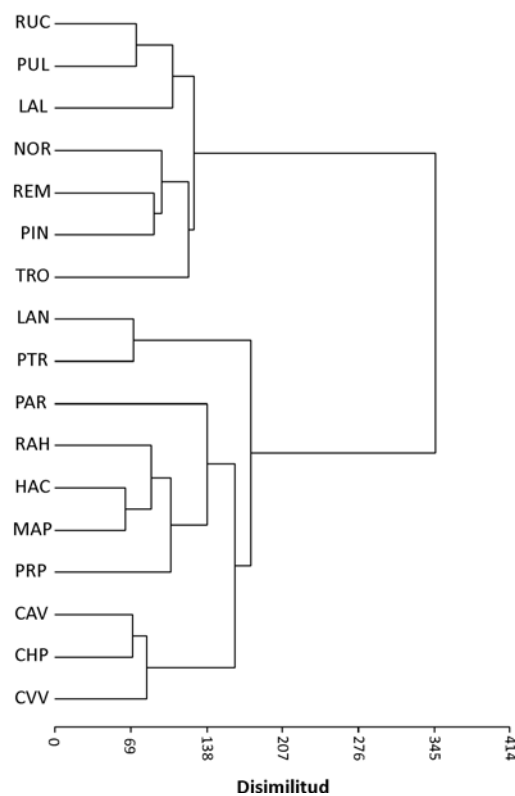


Figura 2.7 Dendrograma de agrupamiento por cluster de las cronologías residuales de *A. araucana* para el período común 1676-1974 (ver Tabla 2.1 por el detalle de los códigos)

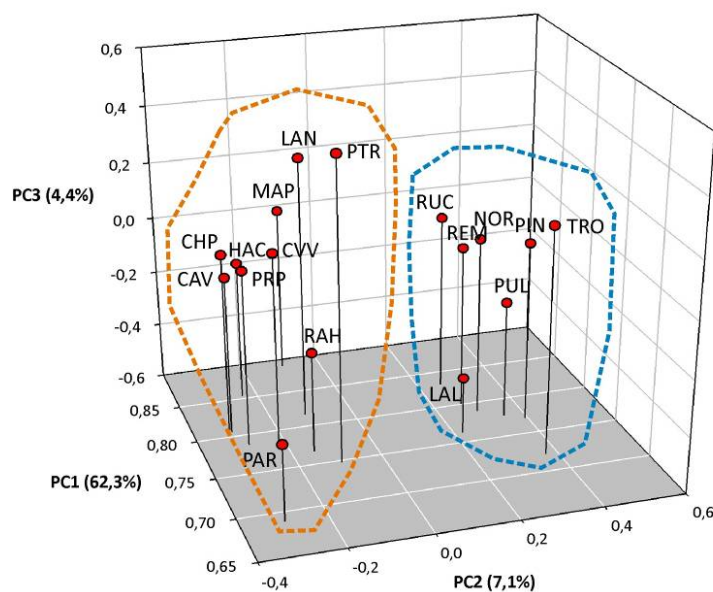


Figura 2.8 Ordenamiento de las cronologías residuales de *A. araucana* a través de un análisis de componentes principales para el período común 1676-1974 (ver Tabla 2.1 por el detalle de los códigos). Agrupamiento naranja: Grupo Estepario; azul: Grupo Mésico.

Tabla 2.5 Matriz de correlaciones entre variables geográficas y las coordenadas del PCA para las cronologías residuales de *A. araucana* dentro del período común 1676-1974 (299 años) (ver códigos y ubicación en Tabla 2.1 y Figura 2.1).

	Lat.	Long.	Temp. media anual	PP. anual	Exp. este	Alt.	Exp. norte	PC1	PC2	PC3
Lat.		0,462	0,070	0,165	0,177	0,599	-0,012	0,059	-0,517	-0,255
Long.			0,136	-0,785	0,145	0,532	-0,211	0,203	-0,598	-0,466
Temp. media anual				0,009	0,001	-0,597	0,094	-0,265	0,314	-0,162
PP. anual					-0,076	-0,246	0,275	-0,263	0,331	0,338
Exp. este						0,264	-0,101	0,018	-0,335	0,284
Alt.							-0,175	0,266	-0,829	-0,205
Exp. norte								-0,043	-0,011	0,365
PC1									-0,130	0,116
PC2										0,000
PC3										

Exp.: exposición. En negrita se presentan valores significativos al umbral $\alpha=0,05$ ($|r| > 0,482$)

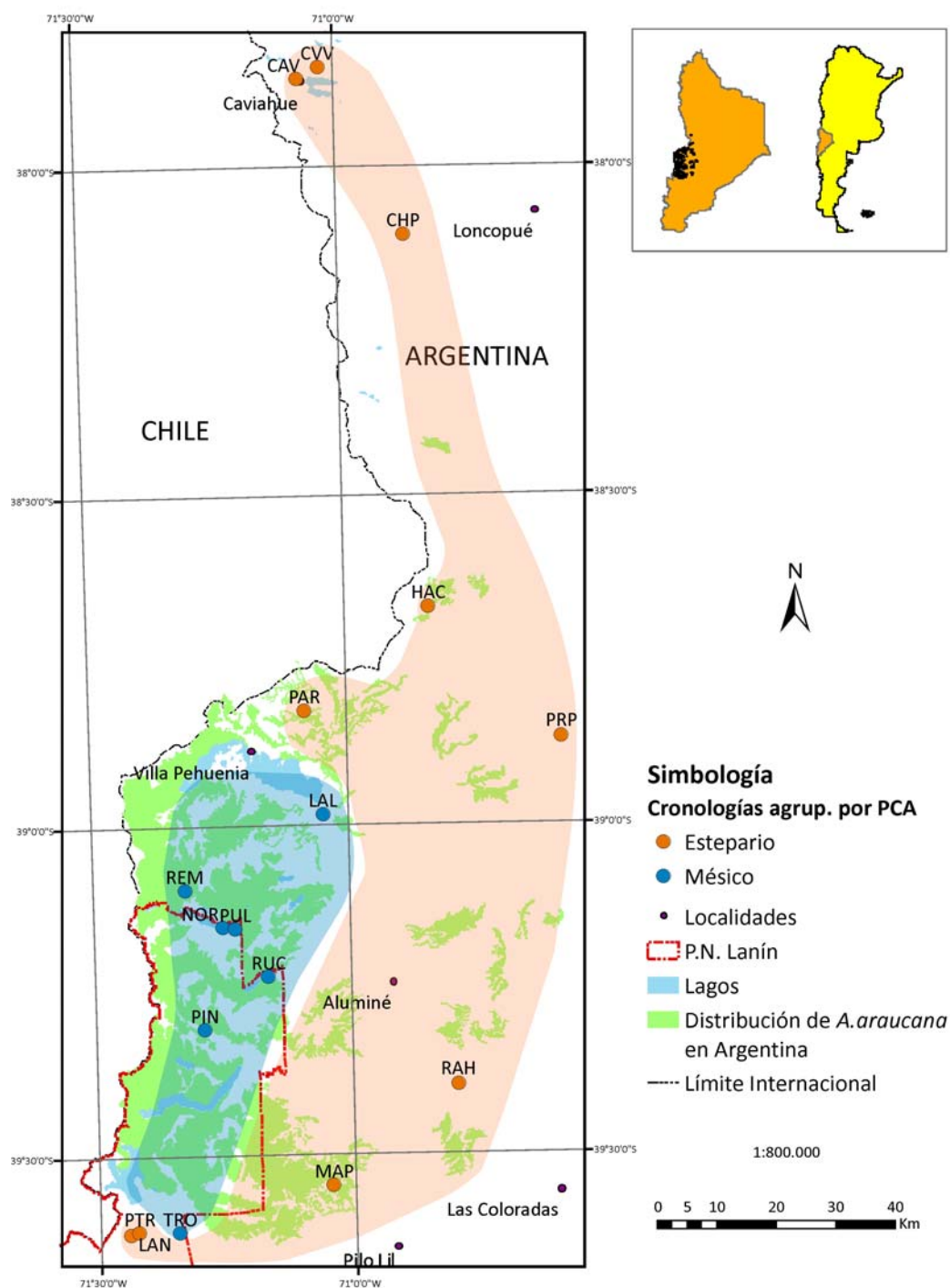


Figura 2.9 Disposición espacial del agrupamiento realizados a través del PCA de las cronologías de ancho de anillos en el área de distribución de *A. araucana* en Argentina. Área azul: grupo méxico y área rosada: grupo estepario (ver Tabla 2.1 por el detalle de los códigos).

En función del análisis de correlación y de los resultados del análisis de cluster y PCA se pudo justificar el agrupamiento de las series de anchos de anillos en una cronología compuesta Regional (promedio de todas las series) y en dos subconjuntos: Grupo Estepario (cronologías con valores negativos en el PC2) y Grupo Mésico (cronologías con valores positivos en el PC2) (Fig 2.9 y 2.10). Al analizar los estadísticos descriptivos de estas cronologías (Tabla 2.6 y Fig. 2.11), se observaron valores similares, detectándose la mayor tasa de crecimiento en el grupo másico. Teniendo en cuenta la evolución del estadístico EPS a lo largo del tiempo en las tres cronologías, se considera que las cronologías compuestas Regional, Esteparia y Mésica son muy robustas y estables, y en consecuencia de alta confiabilidad, a partir de 1425, 1420 y 1385 respectivamente (Fig. 2.11).

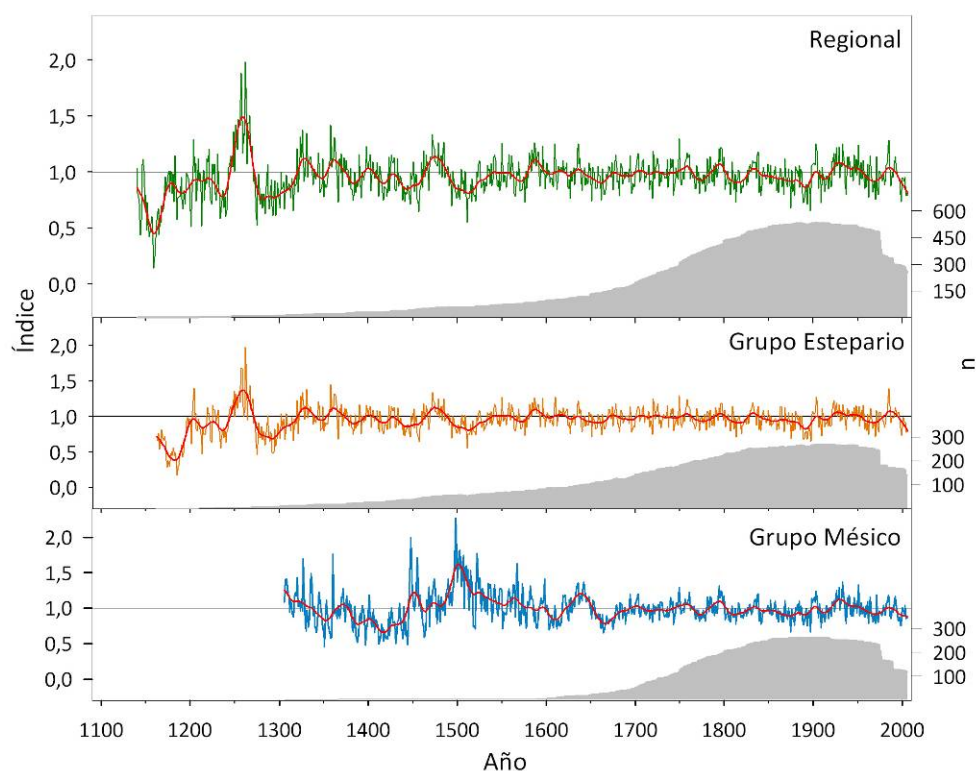


Figura 2.10 Cronologías standard regional, esteparia y másica de *A. araucana*. En rojo aparecen, en forma superpuesta, curvas spline de 25 años. En la parte inferior se muestran el número de muestras como áreas grises.

Tabla 2.6 Estadísticos descriptivos de las cronologías compuestas regional, esteparia y méstica de *A. araucana*

Grupo	Período	Datos de medición		Cronologías standard	
		IMA ^a (mm)	Sensibilidad Media	RBAR medio ^b	Autocorrelación
Regional	1140-2006	0,864	0,205	0,130	0,607
Estepario	1162-2006	0,779	0,202	0,144	0,632
Mésico	1306-2006	0,959	0,208	0,139	0,616

^a IMA, Incremento Medio Anual

^b RBAR medio, índice de correlación promedio entre series ponderado por el número de muestras

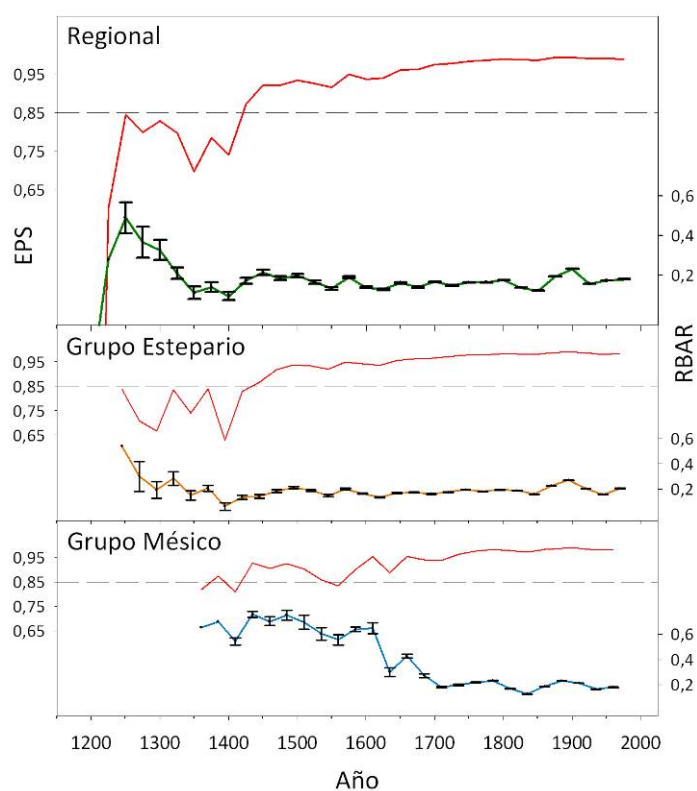


Figura 2.11 Estadísticos EPS (curvas rojas) y RBAR móviles (curvas con barras de error standard) de las cronologías standard regional, esteparia y méstica de *A. araucana*.

2.3.3 Influencia climática en el crecimiento de *A. araucana*

El análisis de correlación indicó que el crecimiento de *A. araucana*, en general, se relaciona negativamente con las temperaturas medias mensuales a lo largo de los 19 meses de

comparación (Fig. 2.12). Al analizar el patrón de correlaciones a nivel regional se observó una señal significativa y de mayor intensidad para el verano anterior a la estación de crecimiento. Al separar las series en grupos Estepario y Mésico se detectó, que en el primero de los casos, la señal es más fuerte debido a los mayores valores de correlación. En el caso de la precipitación, la relación no es tan clara como con la temperatura. Sin embargo, a nivel regional se observó que las altas precipitaciones en enero del año anterior como así también las correspondientes a septiembre y octubre de la estación de crecimiento tuvieron una influencia positiva en el crecimiento radial de la especie. Al comparar los patrones de correlación a nivel de grupos, se observaron respuestas similares a la precipitación aunque con una leve variación.

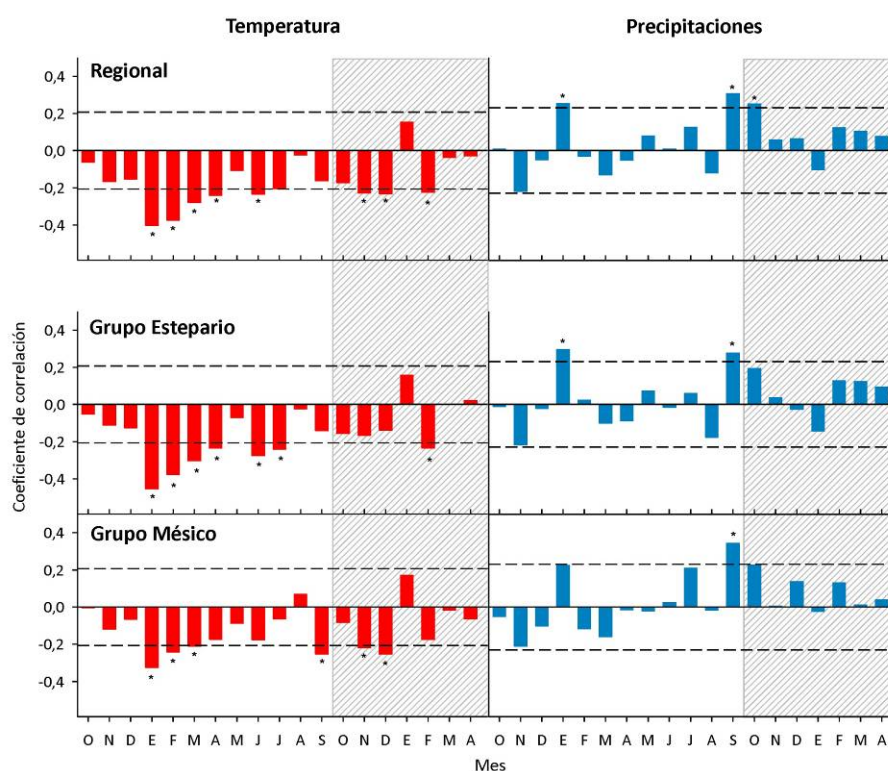


Figura 2.12 Coeficientes de correlación mensuales entre los registros regionales normalizados de temperatura (1916-2005) y precipitaciones (1929-2001) y las cronologías compuestas Regional, Esteparia y Mésica para 19 meses. En todos los gráficos, el área rayada corresponde a la estación de crecimiento (octubre-abril) y las líneas cortadas representan los niveles de confianza para $\alpha = 0,05$.

Al promediar los desvíos normalizados por trimestres para ambos registro meteorológicos, se observó la misma tendencia para la temperatura (Fig 2.13). En la comparación de esta

variable con la cronología Regional, la señal nuevamente tuvo mayor intensidad en el verano del año anterior (DEF). El grupo Estepario mostró el mismo patrón que el Regional. En el caso de la cronología del grupo Mésico, la correlación negativa del verano del año anterior tuvo la misma intensidad que al comienzo de la estación de crecimiento. En el caso de la precipitación, el agrupamiento trimestral permitió reconocer una relación positiva con el crecimiento regional para toda la estación de crecimiento, siendo significativa para el inicio y fin de este período (SON y MAM respectivamente). Este patrón también se observó al agrupar las series en los grupos Estepario y Mésico aunque con leves variaciones en la magnitud.

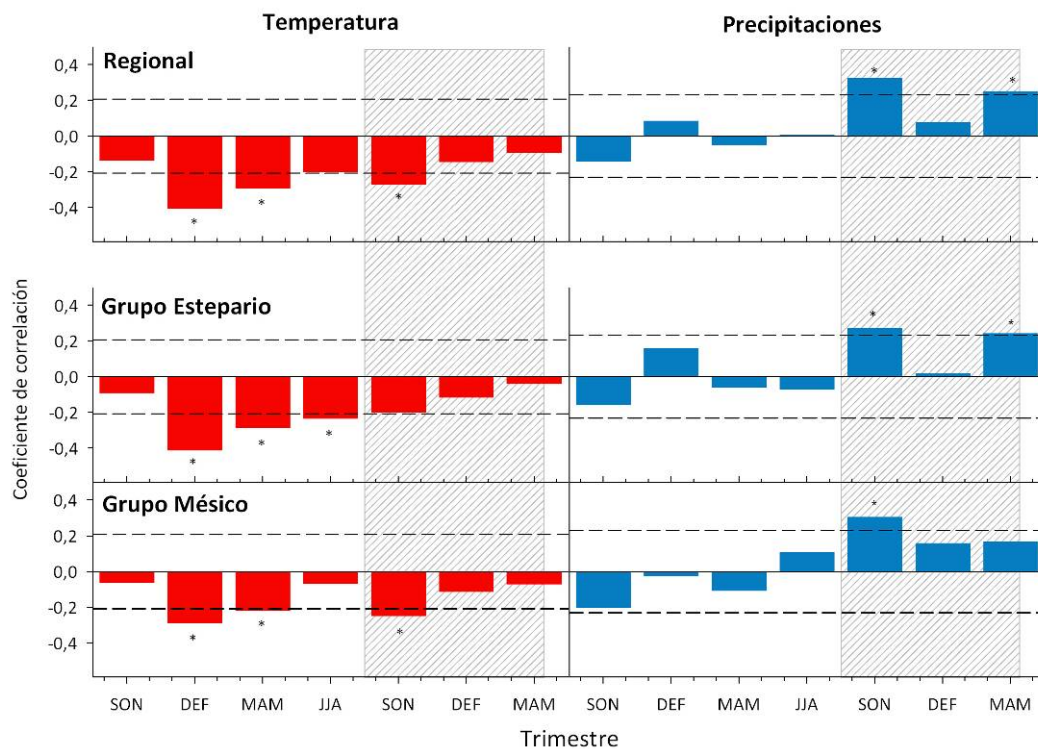


Figura 2.13 Coeficientes de correlación trimestral entre los registros regionales normalizados de temperatura (1916-2005) y precipitaciones (1929-2001) y las cronologías compuestas Regional, Esteparia y Mésica. En todos los gráficos, el área rayada corresponde a la estación de crecimiento (octubre-abril) y las líneas cortadas representan los niveles de confianza para $\alpha = 0,05$. SON: septiembre-octubre-noviembre; DEF: diciembre-enero-febrero; MAM: marzo-abril-mayo; JJA: junio-julio-agosto.

Por otra parte, al comparar las cronologías residuales Regional, Esteparia y Mésica con una reconstrucción de precipitaciones para el norte de Patagonia (1600-1988) realizada por Villalba et al. (1998) con series de anchos de anillos de *Austrocedrus chilensis*, se observó una muy alta y

significativa asociación (Fig 2.14). Cabe aclarar que el nivel de significancia ($\alpha=0,05$) del coeficiente de correlación para 388 años de comparación es de 0,100. Al analizar por grupos, se halló una relación levemente máyor de la cronología Mésica con esta reconstrucción de precipitaciones.

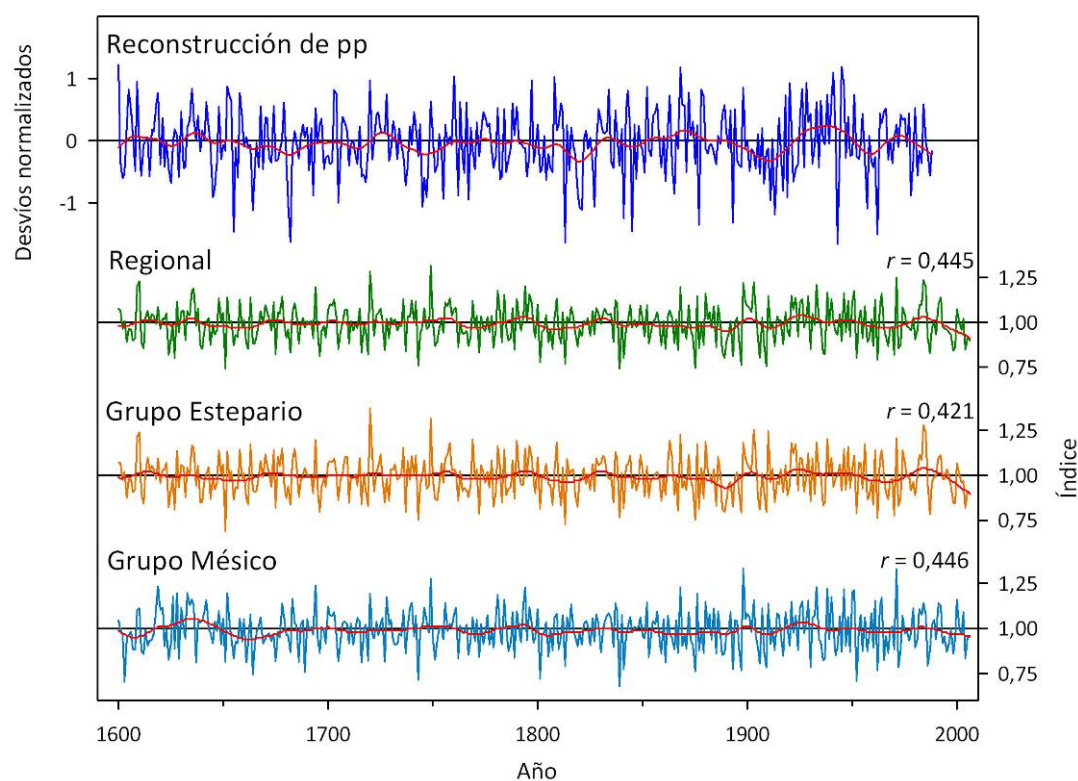


Figura 2.14 Curvas de la reconstrucción de precipitaciones de noviembre-diciembre para el norte de Patagonia (1600-1988) realizada por Villalba et al. (1998) y las cronologías residuales Regional, Esteparia y Mésica. Se indica el valor de índice de correlación r de cada cronología con la serie de precipitaciones. Sobre cada registro se presentan en forma superpuesta y con color rojo las curvas spline de 25 años.

En el caso del índice de severidad de sequía de Palmer (PDSI), se observó que la relación con el crecimiento muestra un patrón positivo a lo largo de los meses correspondientes a la estación de crecimiento de la especie a nivel regional (Fig. 2.15). Sin embargo, solamente se encontró una asociación significativa para el mes de diciembre. Al desglosar el análisis por cronologías Esteparia y Mésica, se halló una señal más fuerte con este último grupo. Este señal

se distinguió más claramente al promediar los valores de PDSI por trimestre, hallándose una relación positiva y significativa durante la estación de crecimiento en la zona mélica (Fig. 2.16).

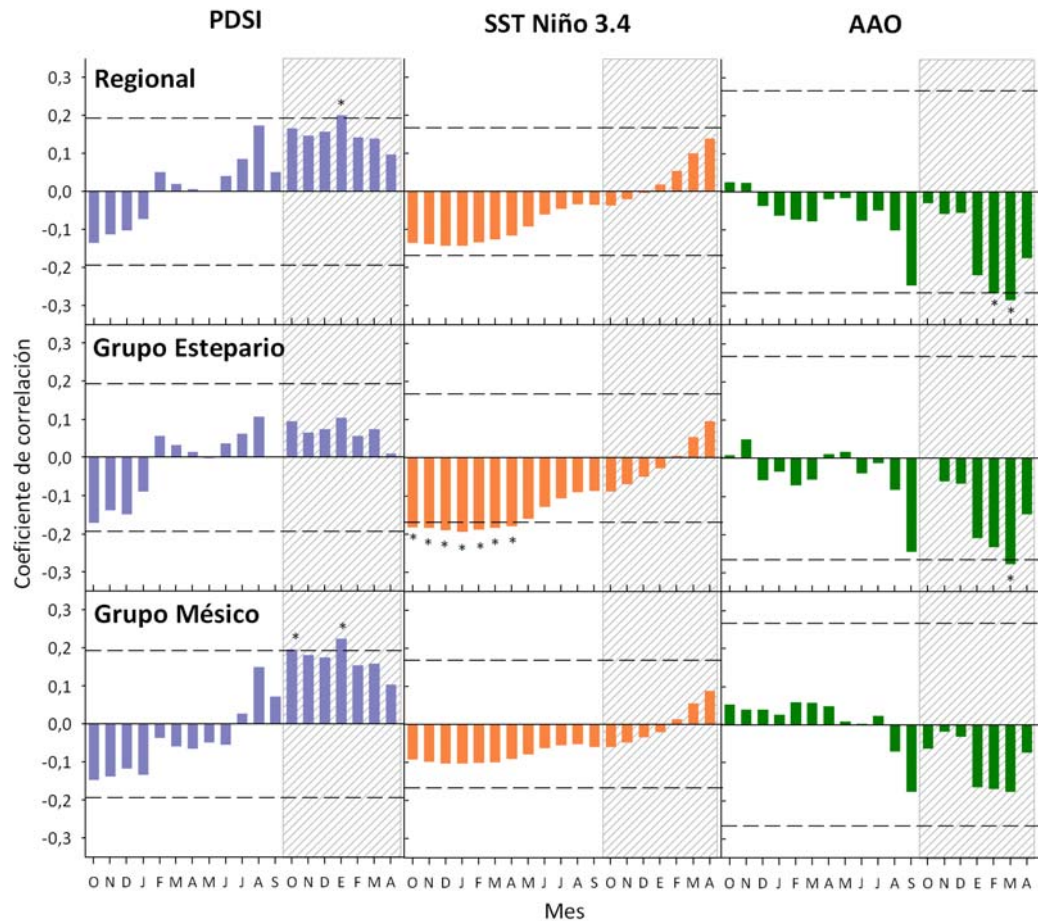


Figura 2.15 Coeficientes de correlación mensual entre el PDSI (1902-2005, Dai et al. 2004), la temperatura del mar para la zona Niño 3.4 (SST Niño 3.4: 1871-2006, (Trenberth y Stepaniak 2001), el Índice de Oscilación Antártico (AAO: 1948-2002, Thompson y Wallace 2000)) y las cronologías compuestas Regional, Esteparia y Mésica. Las áreas rayadas corresponden a la estación de crecimiento (octubre-abril) y las líneas cortadas representan los niveles de confianza para $\alpha = 0,05$.

Al analizar la relación de la temperatura del mar en la zona Niño 3.4 con el crecimiento de *A. araucana*, se observó una asociación negativa, teniendo su mayor expresión en el verano anterior (Fig 2.15). Las correlaciones solamente fueron significativas con el grupo Estepario para ese período de tiempo al analizarlo en forma mensual. Al promediar las SST Niño 3.4 por trimestres, se observó esa misma tendencia negativa, siendo solamente significativa para la

cronología Esteparia para los trimestres correspondientes a la estación de crecimiento del año previo (Fig 2.16).

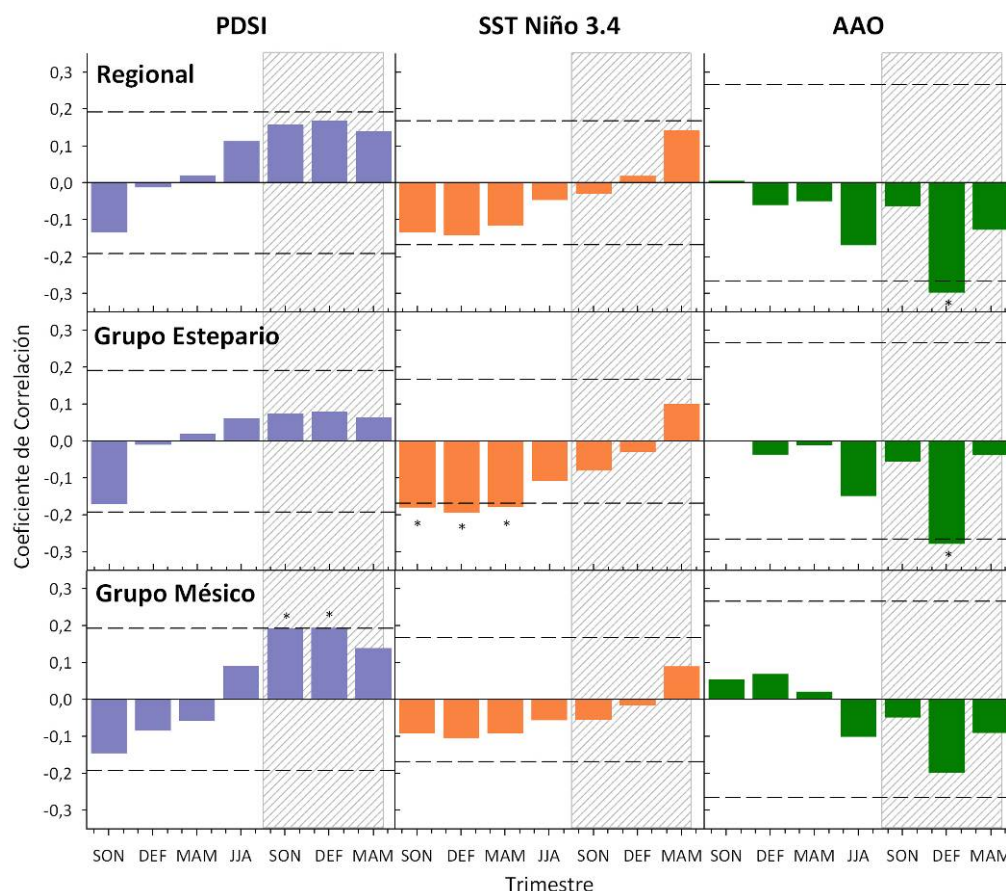


Figura 2.16 Coeficientes de correlación trimestral entre el PDSI (1902-2005, Dai et al. 2004), la temperatura del mar para la zona Niño 3.4 (SST Niño 3.4: 1871-2006, (Trenberth y Stepaniak 2001), el Índice de Oscilación Antártico (AAO: 1948-2002, Thompson y Wallace 2000) y las cronologías compuestas Regional, Esteparia y Mésico. Las áreas rayadas corresponden a la estación de crecimiento (octubre-abril) y las líneas cortadas representan los niveles de confianza para $\alpha = 0,05$.

La Oscilación Antártica (AAO) presentó una respuesta negativa en el crecimiento de *A. araucana* a lo largo de los 19 meses analizados a nivel regional, con una expresión significativa en los meses de enero y febrero correspondientes a la estación de crecimiento (Fig. 2.15). La separación de las cronologías por grupo Estepario y Mésico permitió reconocer una señal más notoria en el primer caso, teniendo en ambas cronologías el mismo patrón que a escala regional. El análisis por trimestre clarificó esta relación en donde se remarcó la asociación

negativa durante la estación de crecimiento, principalmente entre diciembre-enero-febrero, siendo significativa a escala regional y a nivel del grupo Estepario (Fig. 2.16).

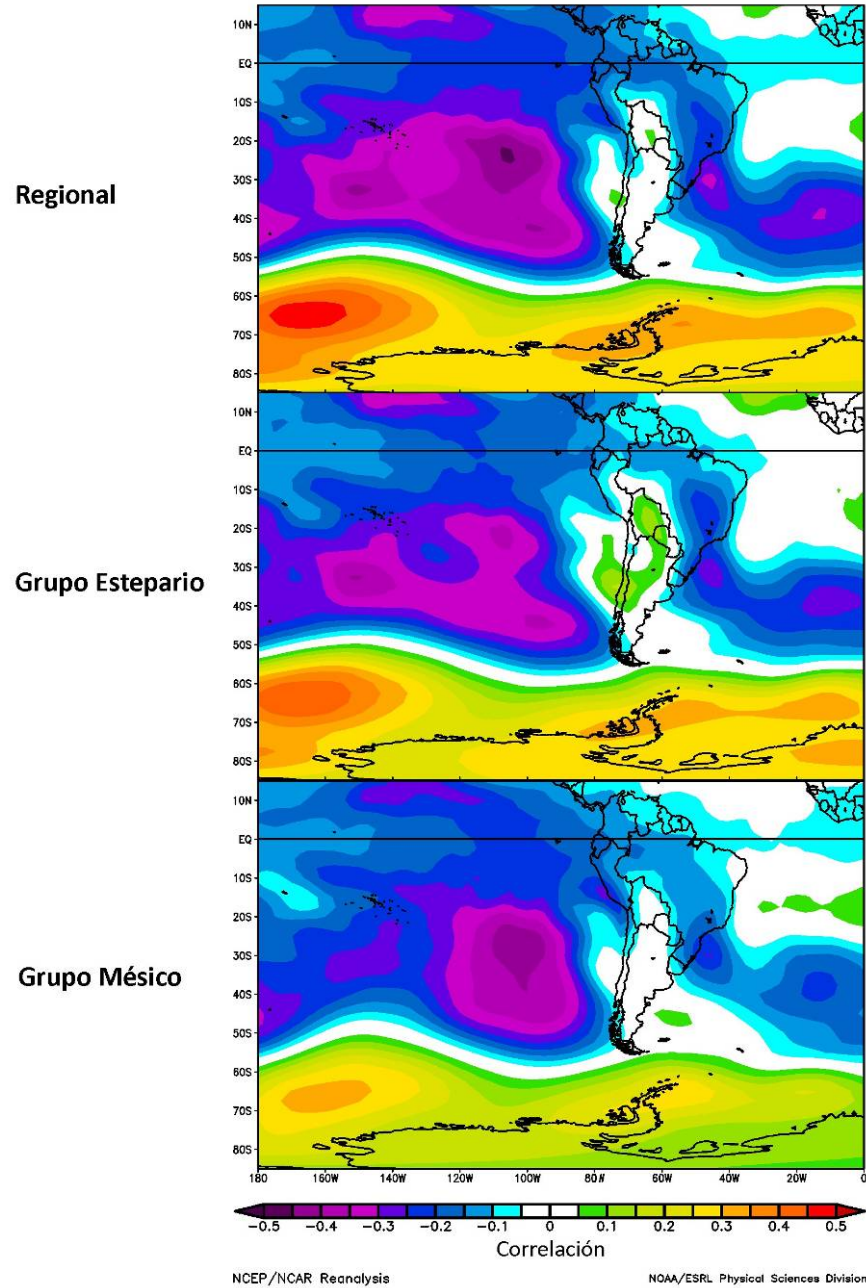


Figura 2.17 Correlación espacial de la cronología Regional, Esteparia y Mésica con la altura geopotencial (850 mb) del trimestre enero-febrero-marzo para el período 1948-2006. En el análisis se compararon los valores trimestrales con los índices de crecimientos correspondientes a la estación de crecimiento de ese momento. Análisis realizados en: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/>

Como consecuencia de esta comparación con la AAO, se analizó la relación del ancho de anillos de las tres cronologías compuestas con la altura geopotencial (850 mb o HPa) en la zona. Nuevamente la mejor asociación se halló entre los meses de enero a marzo durante la estación de crecimiento (Fig 2.17). De esta manera, se observó que el crecimiento de *A. araucana* a nivel regional se ve favorecido por altos valores de altura geopotencial en la zona de la Antártida. Al igual que en el análisis de correlación con las series de la AAO la asociación resultó más clara a nivel regional y a nivel de grupos, con la cronología Esteparia.

2.4 DISCUSIÓN

Los análisis presentados en este capítulo constituyen una perspectiva regional en las relaciones entre el clima y el crecimiento radial de *A. araucana* en su área de distribución en Argentina.

A pesar de las dificultades que surgieron debido a las particularidades en la anatomía de la madera de esta especie, se pudieron confeccionar cronologías de larga extensión y confiabilidad estadística. Los períodos en los cuales los valores de EPS cayeron por debajo del umbral de 0.85 pueden ser atribuibles a la poca cantidad de muestras en esos intervalos y/o una disminución en la correlación de los segmentos en comparación. Sin embargo, dado que en cada cronología solamente se consideraron aquellas series que se encontraban correctamente cofechadas con otras series, no debe inferirse que en esas porciones existen problemas de fechado. Igualmente, debería tenerse en cuenta estas particularidades a la hora de utilizar las cronologías para diferentes reconstrucciones de variables climáticas o hidrológicas.

Las nuevas cronologías desarrolladas en este estudio permitieron obtener registros de variada longitud. En general, los sitios con cronologías más largas corresponden a lugares de más difícil acceso, por ejemplo Volcán Lanín. A pesar que todos los muestreos se realizaron en sitios sin señales de disturbio, es posible que las cronologías más cortas estén asociadas a situaciones que sufrieron algún tipo de perturbación que limite actualmente tener individuos más longevos. Cabe destacar que en muchos casos los tarugos no alcanzaron la médula de los árboles barrenados debido a algunas limitaciones del instrumental utilizado. La gruesa corteza de la especie provocó que el largo total de los tarugos siempre tuviera una fracción importante

de tejido no xilemático (floema, periderma y ritidoma), generando la pérdida de los primeros anillos. Por lo tanto, utilizando barrenos de incrementos o Pressler de mayor longitud sería posible extender aún más los registros.

Cabe destacar el grado de similitud entre todas las cronologías analizadas. Este hecho se pudo distinguir en primera instancia a través del listado de los anillos indicadores establecido por el método de la lista (Yamaguchi 1991). De esta manera, se distinguieron claramente años de iguales características, principalmente los anillos más angostos, en toda el área de distribución analizada. El hallazgo de esta similitud entre las cronologías a través del análisis de correlación de todas las series, permite afirmar que existe una señal de crecimiento muy semejante en la región considerada. De otro modo, es posible afirmar que existen condiciones de variabilidad climática semejantes en toda la zona lo que se ve expresado por patrones de crecimiento similares. De esta manera se justificó la creación de una cronología regional. Este registro promedio, que incluyó en total 621 series, resultó en una sintética expresión del crecimiento de *A. araucana* en toda la región. Por otra parte, dada la bondad de los estadísticos analizados, esta cronología regional puede considerarse robusta ya que se mejoró el comportamiento del RBAR y EPS en comparación con las cronologías por sitio.

A través del análisis cluster y del PCA surgió claramente la existencia de dos grupos de cronologías: uno que reunió a los sitios ubicados hacia el este, llamado Estepario por su proximidad a ese tipo de fisonomía vegetal, y otro hacia el oeste, llamado Mésico por su mayor disponibilidad hídrica debido al gradiente de precipitaciones oeste-este. La significancia en la correlación de las coordenadas del PC2 de las cronologías con variables geográficas demostró que el primer grupo es el ubicado hacia el este, en posiciones de mayor altitud y en consecuencia con menores temperaturas medias y bajas tasas de precipitación debido a su ubicación geográfica en el gradiente de esta última variable.

Merece la pena destacar que las cronologías de los sitios Paso Tromen y Volcán Lanín (ambas muy próximas) ingresaron al grupo Estepario en función de sus patrones de crecimiento a pesar que se hallan más cercanas a una condición mélica. Sin embargo, el comportamiento de

ambas podría deberse a su ubicación de crecimiento sobre los faldeos del Volcán Lanín en el extremo sur de distribución de la especie.

En relación a la respuesta al clima, al igual que lo observado por Villalba (1995) la relación más fuerte se encontró con la temperatura del verano anterior. Sin embargo, en este estudio surgió una relación negativa más estable tanto a nivel regional como por grupos para esta variable climática en el análisis mensual como trimestral a lo largo del período de tiempo analizado. En el caso de las precipitaciones, los resultados presentados en este capítulo permiten afirmar que el crecimiento de la especie es sensible a la disponibilidad hídrica aportada por las precipitaciones. A pesar de no tener una respuesta tan marcada como con las temperaturas, el agrupamiento por trimestres permitió ver la asociación positiva durante la estación de crecimiento. Este hecho se vio claramente reafirmado al correlacionar en forma positiva y significativa con una reconstrucción de casi 400 años de precipitaciones de noviembre-diciembre realizada con una cronología de anchos de anillos de *A. chilensis* en el norte de Patagonia (Villalba et al. 1998).

En función de lo anteriormente planteado, se esperaba que la relación del crecimiento con el PDSI fuese más notable. A pesar de tener valores positivos y significativos durante la estación de crecimiento, la respuesta de *A. araucana* a este índice, que resulta en una expresión de déficit hídrico, no fue tan notable como lo encontrado por Mundo et al. (2010) y Christie et al. (2010) en *A. chilensis*. En el futuro, debería calcularse este índice para diferentes localidades dentro del área de distribución de *A. araucana* de manera de tener una mejor representación areal de esta variable. Sin embargo, la escasez de registros meteorológicos confiables y datos de perfiles de suelos, variables necesarias para el cálculo de este índice, hace bastante dificultosa esta tarea.

Al analizar las relaciones con la temperatura del mar en la zona Niño 3.4, indicador de la actividad de El Niño-Oscilación Sur (ENSO) y la AAO, con el crecimiento de la especie se halló una relación que reafirma lo observado con las variables climáticas locales. La asociación positiva de la SST Niño 3.4 con el crecimiento de *A. araucana* muestra un patrón similar a lo observado con la temperatura. Este hecho confirma lo observado por Garreaud et al. (2009) en

un análisis a nivel continental, en donde encontraron una asociación positiva y significativa entre el índice multivariado del ENSO (MEI) y la temperatura del norte de Patagonia, principalmente para el trimestre marzo-abril-mayo. Además, Montecinos y Aceituno (2003) demostraron que en la zona 38-41° de Chile se produce un déficit de lluvia en el verano siguiente a la ocurrencia de eventos El Niño. Por lo tanto, la relación negativa del crecimiento de la especie con un lag de 1 año con la SST Niño 3.4 tendría algún tipo de relación con ese efecto trasladado en el tiempo que observaron Montecinos y Aceituno (2003) para la precipitación en Chile en similar latitud.

En el caso de la AAO su expresión negativa se correspondería con la respuesta a las precipitaciones durante la estación de crecimiento. Dado que las fases positivas corresponden a un desplazamiento de los “westerlies” hacia la Antártida, vientos encargados de aportar precipitaciones en la zona, valores positivos de esta variable indican períodos de déficit hídrico para *A. araucana*. Aravena y Luckman (2009) observaron una relación significativa entre las precipitaciones del norte de Patagonia y la AAO. Además, dado que los altos valores de la altura geopotencial en la Antártida corresponden a fases negativas de la AAO, la relación positiva de esta variable con el crecimiento de *A. araucana* resulta concordante.

A modo de síntesis se puede afirmar que el bajo crecimiento radial de la especie observado en ciertos años estaría determinado por veranos previos de altas temperaturas y/o por estaciones de crecimiento con bajas precipitaciones. En términos de forzantes climáticos, el bajo crecimiento estaría asociado a eventos El Niño en el verano anterior y/o fases negativas de la AAO durante la época de crecimiento. En un contexto de cambio climático actual con un aumento de temperaturas más o menos constante durante los últimos años y un descenso de las precipitaciones (Fig 2.3), no resulta sorprendente el patrón de disminución en el crecimiento que se observa regionalmente y a nivel de grupo Estepario y Mésico desde fines de la década de los 70'. En función de los modelos de simulaciones recientemente publicados por el IPCC en su Fourth Assessment Report (Christensen et al. 2007) que predice condiciones aún más secas a lo largo de los Andes australes para el siglo XXI y las simulaciones continentales realizadas por Labraga (1998) que pronostican un descenso de las precipitaciones de verano (entre 2 y 42%

sobre los valores medios actuales) para el 2070 en el noroeste de Patagonia, no sería extraño esperar un mayor descenso en la tasa de crecimiento de *A. araucana* para los próximos años. Este hecho debería ser una advertencia para la reconsideración de las estrategias de conservación y manejo de estos bosques en el mediano plazo.

2.5 BIBLIOGRAFÍA

- Anderberg, M. 1973. Cluster analysis for applications. Academic Press, New York.
- Aravena, J., y B. H. Luckman. 2009. Spatio-temporal rainfall patterns in Southern South America. *International Journal of Climatology* 29:2106-2120.
- Blasing, T., A. Solomon, y D. Duvick. 1984. Response function revisited. *Tree-Ring Bulletin* 44:1-15.
- Christensen, J., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R. Kolli, W. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr, y P. Whetton. 2007. Regional climate projections. Páginas 847-940 en S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, y H. Miller, editores. *Climate Change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Christie, D., J. Boninsegna, M. Cleaveland, A. Lara, C. Le Quesne, M. Morales, M. Mudelsee, D. Stahle, y R. Villalba. 2010. Aridity changes in the Temperate-Mediterranean transition of the Andes since ad 1346 reconstructed from tree-rings. *Climate Dynamics* - online first. doi: 10.1007/s00382-009-0723-4.
- Cook, E. 1985. A time series analysis approach to tree ring standardization. University of Arizona, School of Renewable Natural Resources, Tucson.
- Cook, E., K. Briffa, S. Shiyatov, y V. Mazepa. 1990. Tree-ring standardization and growth-trend estimation. Páginas 104-132 en E. Cook y L. Kairiukstis, editores. *Methods of dendrochronology - Applications in the environmental sciences*. Kluwer Academic Publishers, Amsterdam.
- Cooley, W., y P. Lohnes. 1971. *Multivariate data analysis*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Dai, A., K. E. Trenberth, y T. Qian. 2004. A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming. *Journal of Hydrometeorology* 5:1117-1130.
- Fritts, H. 1976. *Tree rings and climate*. Academic Press, London.
- García-González, I., E. Díaz-Vizcaíno, y A. Martínez-Cortizas. 1997. Evidence for a common and a species-specific climatic response of Oak and Birch on a Northern Galician site (NW SPAIN) by means of multivariate procedures. *Dendrochronologia* 15:119-127.
- Garreaud, R. D., M. Vuille, R. Compagnucci, y J. Marengo. 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 281:180-195. doi: 10.1016/j.palaeo.2007.10.032.

- Holmes, R. L., C. W. Stockton, y V. LaMarche. 1979. Extension of river flow records in Argentina from long tree-ring chronologies. *Journal of the American Water Resources Association* 15:1081-1085.
- Holmes, R. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin* 43:69-75.
- Labraga, J. 1998. Escenario de Cambio Climático para la Argentina. *Ciencia Hoy* 8:18-25.
- LaMarche, V., R. Holmes, P. Donwiddie, y L. Drew. 1979. Tree-ring chronologies of the southern hemisphere. University of Arizona.
- Montecinos, A., y P. Aceituno. 2003. Seasonality of the ENSO-Related Rainfall Variability in Central Chile and Associated Circulation Anomalies. *Journal of Climate* 16:281-296.
- Mundo, I., V. El Mujtar, M. Perdomo, L. Gallo, R. Villalba, y M. Barrera. 2010. Austrocedrus chilensis growth decline in relation to drought events in northern Patagonia, Argentina. *Trees - Structure and Function* 24:561-570. doi: 10.1007/s00468-010-0427-8.
- Palmer, J. 1965. Meteorological drought. U.S. Department of Commerce, Washington, D.C.
- Peters, K., G. Jacoby, y E. Cook. 1981. Principal components analysis of tree-ring sites. *Tree-Ring Bulletin* 41:1-19.
- Piraino, S., I. Mundo, F. Roig Juárez, y A. Srur. 2007. Dendroclimatología de Araucaria araucana (Molina) K. Koch en el Paso Tromen: función evolucionaria y relación con otras cronologías. III Reunión Binacional de Ecología, La Serena, Chile.
- Savva, Y., J. Oleksyn, P. Reich, M. Tjoelker, E. Vaganov, y J. Modrzynski. 2006. Interannual growth response of Norway spruce to climate along an altitudinal gradient in the Tatra Mountains, Poland. *Trees - Structure and Function* 20:735-746. doi: 10.1007/s00468-006-0088-9.
- Schulman, E. 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. University of Arizona Press, Tucson.
- Shiyatov, S. 1986. Dendrochronology of the higher timber line on the Urals. Nauka, Moscow.
- Stokes, M., y T. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press, Chicago.
- Thompson, D., y J. Wallace. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *Journal of Climate* 13:1000-1016.
- Tortorelli, L. 1956. Maderas y Bosques Argentinos. ACME, Buenos Aires.
- Trenberth, K. E., y D. P. Stepaniak. 2001. Indices of El Niño Evolution. *Journal of Climate* 14:1697-1701.
- Villalba, R. 1995. Geographical variations in the tree-growth responses to climate in the Southern Andes. Páginas 307-317 *en* J. Argollo y P. Mourguiart, editores. Cambios cuaternarios en América del Sur. ORSTOM-HISBOL, La Paz.
- Villalba, R., J. A. Boninsegna, y D. R. Cobos. 1989. A tree-ring reconstruction of summer temperature between A.D. 1500 and 1974 in western Argentina. Páginas 196-197 *en* Third International Conference on Southern Hemisphere Meteorology & Oceanography. Buenos Aires.
- Villalba, R., E. Cook, G. Jacoby, R. D'Arrigo, T. Veblen, y P. Jones. 1998. Tree-ring based

- reconstruction of northern Patagonia precipitation since AD 1600. *The Holocene* 8:659-674.
- Villalba, R., y T. Veblen. 1997. Spatial and temporal variation in *Austrocedrus* growth along the forest-steppe ecotone in northern Patagonia. *Canadian Journal of Forest Research* 27:580-597.
- Wigley, T., K. Briffa, y P. Jones. 1984. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 23:201-213.
- Yamaguchi, D. 1991. A simple method for cross-dating increment cores from living trees. *Canadian Journal of Forest Research* 21:141-146.

Cronologías de incendios en bosques de *Araucaria araucana*, influencia antrópica y relación con el clima

CAPÍTULO 3

3.1 INTRODUCCIÓN

Las cicatrices de fuego constituyen una excelente fuente de datos para establecer el momento y la frecuencia de incendios ya que permiten datar con precisión anual los eventos que afectaron los bosques en el pasado (Agee 1993). Una cicatriz se forma en un árbol cuando el fuego adyacente persiste el tiempo suficiente para elevar la temperatura del cambium vascular a un nivel letal o directamente consumir la corteza, el cambium y una porción del xilema adyacente (McBride 1983). Un proceso de rejuvenecimiento se inicia desde los márgenes del área de la herida con la formación de un callo en donde se forma un nuevo cambium vascular y felógeno. Cada año sucesivo, este callo, mediante la formación de nuevo tejido xilemático, se expande lentamente sobre la superficie expuesta desde ambos márgenes y, si no es interrumpido por fuegos posteriores termina encapsulando la herida (McBride 1983). En el eje axial de los fustes, las cicatrices de fuego se diferencian de aquellas generadas por otro tipo de disturbios debido a su forma triangular, con su base mayor en la base del árbol (*cat face scar*) y por la presencia de carbón (Arno y Sneek 1977). En el plano transversal, a través de métodos dendrocronológicos es posible datar los eventos de incendios en función de su posición en los anillos de crecimiento y de esta manera reconstruir la frecuencia y estacionalidad de los incendios (Dieterich y Swetnam 1984).

En el norte de la Patagonia andina argentina, se ha podido reconstruir la historia de incendios en bosques de *Austrocedrus chilensis*, *Fitzroya cupressoides*, *Nothofagus pumilio* y *N. dombeyi* mediante el uso de técnicas dendrocronológicas (Kitzberger y Veblen 1997, Kitzberger et al. 1997, Veblen et al. 1999). En los bosques dominados por *A. chilensis*, el registro cronológico de las cicatrices de fuego mostró la existencia de un incremento sustancial en la frecuencia de fuegos hacia mediados del siglo XIX (Kitzberger y Veblen 1997). Este aumento

coincidió con la expulsión de los pueblos originarios del Distrito de los Lagos de Chile (aproximadamente 37 a 41° S) y su migración hacia Argentina como consecuencia del asentamiento de colonos europeos en Chile. El asentamiento de estos grupos tuvo lugar principalmente en los tipos de vegetación xérica (sitios de *A. chilensis* en el ecotono con la estepa), los cuales fueron el ambiente natural del guanaco, la principal presa de caza, fuente de carne y piel. Por el contrario, el menor uso por parte de los indígenas de los bosques mésicos durante el período anterior al establecimiento de colonos preponderadamente europeos quedó reflejado en la baja frecuencia de fuegos en estos hábitats. La frecuencia de los fuegos aumentó nuevamente en forma sustancial en la década de 1890 en asociación con el establecimiento de los colonos en el norte de la Patagonia. En este caso, sin embargo, el aumento más notable en la frecuencia de fuegos ocurrió en los bosques mésicos de *N. dombeyi* y en los bosques mixtos de esta especie con *A. chilensis*, los que fueron quemados en forma extensiva por los colonizadores europeos en sus intentos de crear espacios de pasturas para el ganado. Desde la década de 1920 aproximadamente, la frecuencia de fuego disminuyó tanto en los bosques mésicos como en los xéricos en respuesta al control del fuego y al cese de los mismos asociados con las poblaciones indígenas (Veblen et al. 1999).

Además, se encontró que durante el período preeuropeo los fuegos en los bosques más húmedos, dominados por *F. cupressoides* y *N. dombeyi*, ocurrieron a intervalos relativamente largos de varios siglos en el caso de incendios intensos y extensivos (Kitzberger et al. 1997, Veblen et al. 1999). Estos fuegos de gran intensidad produjeron la muerte de la mayoría de las especies de árboles con excepción de los ejemplares de *F. cupressoides*, cuyas cortezas gruesas y esponjosas habrían contribuido a evitar daños letales sobre el cambium vascular. Los fuegos que afectaron rodales puros de *N. dombeyi*, así como los mixtos de *N. dombeyi*-*A. chilensis*, fueron también altamente severos y relativamente infrecuentes (Kitzberger 1994). En los bosques mésicos, la ocurrencia de fuegos y particularmente el tamaño en superficie de los mismos están vinculados a situaciones con déficit hídrico durante las estaciones de primavera y verano (Kitzberger et al. 1997).

Araucaria araucana ofrece un gran potencial de registro de incendios. Esta característica se debe a su capacidad de resistir incendios de baja y mediana intensidad por su gruesa corteza, y por posibilitar un amplio análisis temporal de eventos de incendios debido a su gran longevidad. Dentro del Parque Nacional Villarrica, IX Región de la Araucanía de Chile, González et al. (2005) y Quezada (2008) utilizaron técnicas dendrocronológicas para reconstruir la historia de incendios en bosques de *A. araucana* en los sectores de Quillelhue (39°35'S y 71°31'W) y Quetrupillán (39°30'S y 71°45'W) respectivamente. En el primer estudio se dataron un total de 144 cicatrices de árboles que permitieron identificar 46 años con eventos de incendios entre 1445 y 2000. De esta manera, se pudo reconstruir la frecuencia de incendios, severidad y la extensión espacial de las áreas quemadas para aproximadamente 4.000 ha. En el período 1696-2000, el intervalo medio compuesto de fuegos varió entre 7 años para todos los eventos y 62 años para aquellos de gran magnitud en bosques de *A. araucana* y *Nothofagus spp.* Se observó que fuegos de alta severidad y gran dispersión fueron relativamente infrecuentes (por ej. 1827, 1909 y 1944) y primariamente afectaron bosques altos de *A. araucana* y *N. pumilio* y bajos con dominancia de *A. araucana* y *N. antarctica*. A pesar que existe abundante evidencia del impacto de los colonos euro-chilenos en la zona, la relativa influencia de esta colonización sobre el patrón temporal de incendios pudo ser sólo tentativamente establecida debido al relativo pequeño número de incendios fechados previo a 1900. Un aparente incremento en la ocurrencia de fuegos fue evidente en el registro de incendios durante la colonización euro-chilena (post 1880) en comparación a los tiempos de ocupación de los pueblos originarios sudamericanos. Sin embargo, los autores advierten que este hecho podría deberse al resultado de la destrucción de evidencia de fuegos antiguos en la madera por eventos devastadores de incendios más actuales (ej. Incendios de 1909 y 1944).

En el estudio de Quezada (2008) el incendio más antiguo se ubicó en el año 1531. La comparación del período indígena con el de la colonización euro-chilena no presentó diferencias significativas, pero sí una disminución del intervalo medio de fuegos para esta última etapa. Esto estaría indicando que las comunidades indígenas han sido también un factor importante en la determinación del régimen de incendios de estos bosques, asociado a la

crianza y al movimiento de ganado, antes de la colonización de la región iniciada en el año 1883. El establecimiento del Parque Nacional Villarrica en 1940 y la aplicación de políticas más efectivas de prevención y combate por parte de CONAF (desde 1970), han resultado en una disminución de la ocurrencia de incendios durante la segunda mitad del siglo XX.

En relación al efecto de las variables climáticas en la historia de incendios en estos bosques de Chile, González y Veblen (2006) observaron que los registros instrumentales como así también las cronologías de ancho de anillos como variables proxies mostraron que la baja disponibilidad de humedad es el mayor factor que influye sobre la ocurrencia de incendios. Para ello utilizaron la historia de incendios en bosques del sector Quillelhue del estudio de González et al. (2005). Años de fuego extensivos fueron fuertemente asociados con veranos cálidos y secos y en algunos casos también tuvieron relación con la condición de sequía del año anterior o los dos años previos. El fenómeno El Niño-Oscilación Sur (ENSO, por su acrónimo en inglés) resultó ser un factor promovedor de la actividad del fuego. En bosques de *A. chilensis* y *F. cupressoides* de Argentina también se observó la misma relación, incluso determinándose que la mayor actividad de incendios ocurre en las últimas fases del evento La Niña y en algunos casos coincidieron con eventos El Niño (Kitzberger y Veblen 1997, Veblen et al. 1999)

A pesar de todos estos antecedentes, en los bosques *A. araucana* de Argentina no se han encontrado antecedentes de aplicación de técnicas dendrocronológicas para reconstruir la historia de incendios. En relación a la frecuencia de estos disturbios en bosques de *A. araucana*, tampoco se sabe si ha habido una modificación en su recurrencia a lo largo del tiempo como lo observado por González et al. (2005) y Quezada (2008) en Chile, como tampoco se ha cuantificado el efecto que ha tenido la creación del Parque Nacional Lanín en 1937 sobre la ocurrencia de incendios. Por último, tampoco se ha estudiado la importancia que han tenido las variables climáticas y los diferentes forzantes que actúan sobre esta región, como la actividad ENSO y la oscilación antártica (AAO, por su acrónimo en inglés) o modo anular sur (SAM, por su acrónimo en inglés).

En consecuencia, los objetivos de este capítulo son 1) reconstruir la historia de incendios en diez bosques de *A. araucana* en Argentina a través de técnicas dendrocronológicas 2) analizar

la frecuencia de estos eventos a lo largo del tiempo y su vinculación con el proceso de ocupación europeo-argentino y la creación del Parque Nacional Lanín, 3) establecer qué variables climáticas son las de mayor importancia para la ocurrencia de incendios en la región y 4) demostrar algún tipo de relación con forzantes climáticos sobre estos disturbios, especialmente con la actividad ENSO y AAO.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1 Muestreos

Los muestreos en bosques de *A. araucana* fueron realizados en las estaciones de verano entre marzo de 2006 y febrero de 2008. Las colecciones se desarrollaron en 10 sitios localizados entre los 37 y 40° S muy próximos a las áreas seleccionadas para los muestreos de tarugos de las cronologías de referencia (Tabla 3.1, Fig 3.1 y Fig 2.1)

Con el objetivo de reconstruir la historia de incendios de cada sitio, se extrajeron secciones transversales parciales de árboles que presentaron cicatrices de incendios. Para ello y con el fin de evitar señal de otro tipo de disturbio, un árbol para ser seleccionado debió tener una cicatriz en forma de “V” invertida, angostándose desde la base del árbol hacia el ápice (en inglés “catface”) y restos de carbón en el área dañada del fuste. De manera de evitar muestrear árboles con un avanzado grado de deterioro por podredumbre que impidiesen obtener muestras completas, se evaluó el estado del material previamente a través de la ejecución de pequeños golpes sobre la superficie expuesta.

Las secciones transversales parciales de árboles vivos o muertos en pie fueron extraídas empleando la metodología propuesta por Arno y Sneek (1977) (Fig. 3.2). La misma consiste en efectuar dos cortes horizontales paralelos y separados entre sí por 2 o 3 cm, para posteriormente liberar la sección realizando palanca con un cincel de pala plana o introduciendo la punta de la motosierra en la base de los cortes horizontales. Esta técnica bien realizada no es destructiva y permite muestrear sin problemas árboles vivos (Arno y Sneek, 1977; Kitzberger et al., 2000).

En cada árbol muestreado se registró la especie, diámetro a 1,3 m de altura (DAP), número visible de cicatrices, orientación geográfica de la cicatriz y altura de la cicatriz en el tronco desde

el nivel del suelo. Además, mediante la utilización de una unidad de posicionamiento global (GPS), se tomaron las coordenadas de cada árbol muestreado.

Tabla 3.1 Características de los sitios de las cronologías de incendios.

Sitio	ID	Latitud S*	Longitud W*	Sup. (ha)	Altitud (msnm)	Pend. (°)	Exp.	n° de muestras
Caviahue	CAV	37°51'18,3"	71°02'19,1"	0,178	1683	6	E (94°)	6
Paso del Arco	PAR	38°49'57,1"	71°03'21,5"	14,403	1433	4	E (101°)	22
Remeco	REM	39°04'00,4"	71°19'49,7"	1,231	1111	22	W (258°)	20
Ñorquínco	NOR	39°09'21,2"	71°15'13,1"	7,326	1170	15	N (344°)	40†
Ruka Choroy	RUC	39°14'01,7"	71°10'24,1"	4,320	1270	9	N (307°)	23
Minchén	MIN	39°15'17,9"	71°13'12,8"	6,412	1287	6	NE (24°)	40†
Pinalada Red.	PIN	39°18'35,4"	71°17'06,3"	0,970	1094	11	NE (52°)	18
Rahue**	RAH	39°23'36,5"	70°47'39,8"	7,852	1463	8	SE (141°)	22
Nahuel Mapi	MAP	39°32'26,7"	71°02'26,6"	56,969	1500	1	N (4°)	31‡
Paso Tromen	TRO	39°35'00,0"	71°27'36,7"	20,526	1215	1	E (90°)	23

ID: Código de identificación de la cronología; msnm: metros sobre el nivel del mar; Sup.: superficie; ha: hectáreas; Pend.: pendiente; Exp.: exposición o aspecto en coordenadas geográficas (azimuth)

* Las coordenadas corresponden al centroide de los polígonos definidos por los árboles muestreados y calculados por el método de la envoltura convexa

** En el caso de Rahue, las coordenadas corresponden a un punto medio entre los dos centroides de los dos polígonos muestreados en el sitio.

† Tanto para Ñorquínco como para Minchén, se utilizaron 14 muestras cedidas por Thomas Kitzberger (inéditas). Esas 28 muestras fueron colectadas en 1997.

‡ Cinco muestras fueron colectadas en el aserradero Yuco S.A. a partir de rollizos extraídos en un aprovechamiento forestal del mismo sitio de muestreo de la Estancia Nahuel Mapi en el año 2005.

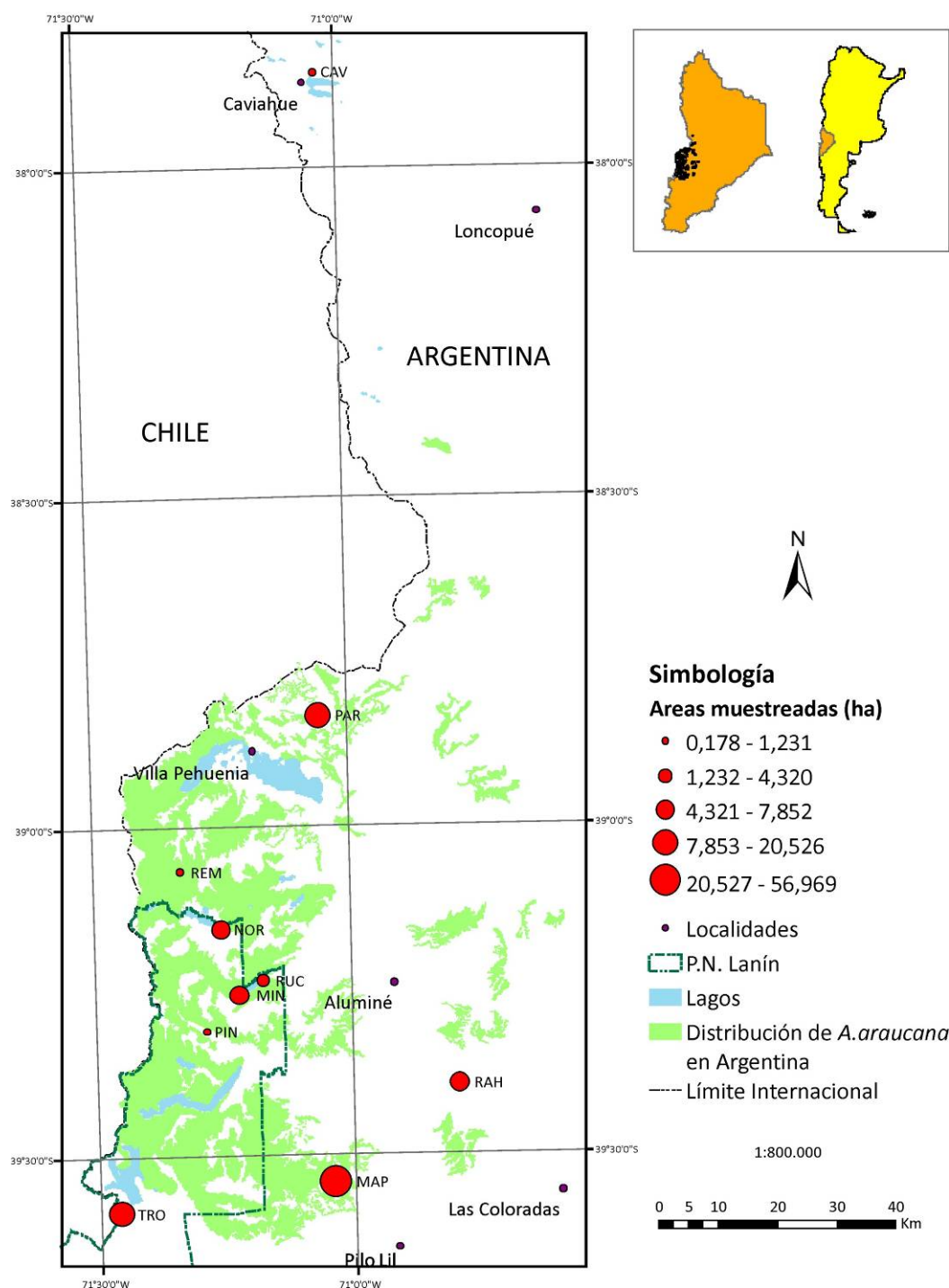
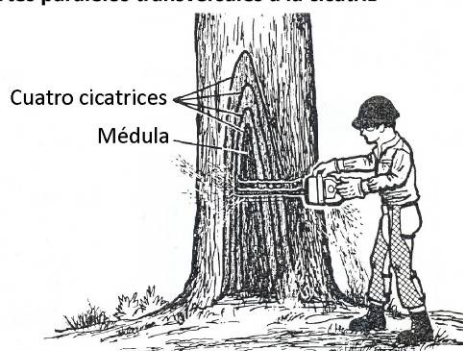
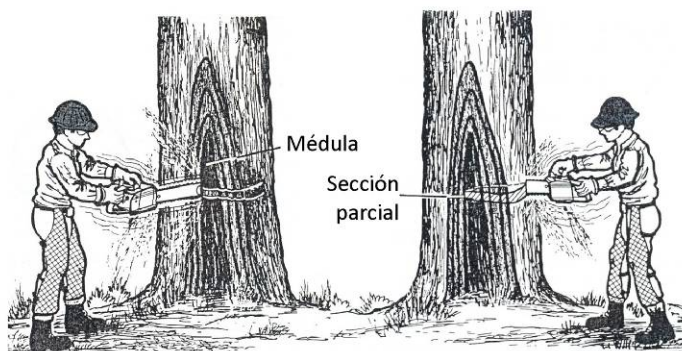


Figura 3.1 Distribución espacial de los sitios de muestreo de cicatrices de fuego en el área de distribución de *A. araucana* en Argentina (ver Tabla 3.1 por el detalle de los códigos). El tamaño de los puntos es proporcional al área muestreada (ver leyenda)

1. Dos cortes paralelos transversales a la cicatriz



2 y 3. Cortes verticales para incluir la médula y el final de la sección parcial



4. Esquema de cortes en el plano transversal

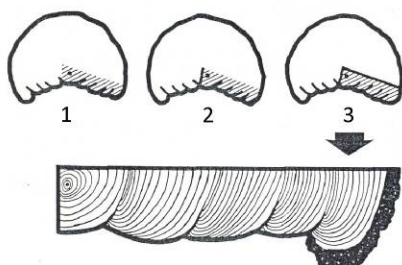


Figura 3.2 Esquema de cortes para la extracción de secciones transversales parciales de árboles con cicatrices de fuego (modificado de Arno y Sneek 1977). A título ilustrativo, se incluyen fotografías tomadas durante los muestreos realizados para este estudio.

3.2.2 Desarrollo de las cronologías de incendios

Al igual que en los tarugos empleados para el desarrollo de las cronologías de referencia (Capítulo 2 de esta tesis), las secciones transversales parciales fueron montadas, pulidas y fechadas visualmente siguiendo los criterios de Stokes y Smiley (1968). En este caso particular, las muestras fueron montadas sobre cartones corrugados triples de manera de garantizar su estabilidad, facilitar su procesamiento y proveer un soporte liviano para su manipulación y almacenaje.

Las secciones fueron cofechadas visualmente bajo lupa binocular (50 x) mediante el método de la lista (Yamaguchi 1991) y se utilizaron como patrones de comparación a las cronologías de referencia desarrolladas en sitios muy próximos (ver Capítulo 2). Nuevamente, los anillos anuales fueron asignados al año de comienzo de la formación del leño siguiendo la convención de Schulman (1956) para el hemisferio sur. En aquellos casos en que no pudo realizarse el cofechado visual, se procedió a medir segmentos de las muestras con una tableta Velmex UniSlide conectada a un contador digital Metronics Quick-Chek QC-10V con una precisión de 0,001 mm. Luego, estas mediciones fueron ingresadas en el programa COFECHA (Holmes 1983) y tratadas como series sin fechar en comparación a las cronologías de referencia de manera de cofectarlas estadísticamente.

Solamente con aquellas muestras que pudieron ser cofechadas ya sea visualmente o estadísticamente, se procedió a la identificación de las cicatrices de fuegos y a la asignación del respectivo año calendario de ocurrencia mediante el uso de una lupa binocular (50 x) (Fig. 3.3). Se determinó la “estacionalidad” de las cicatrices (*seasonality*), es decir, el momento relativo de la ocurrencia de un daño por fuego en función del grado de desarrollo del anillo de crecimiento en aquellos casos que fue posible. Esta determinación se realizó en función de la posición de la cicatriz dentro del anillo, teniendo como referencia las porciones de leño temprano y tardío (Dieterich y Swetnam 1984). Se establecieron cinco categorías de estacionalidad para las cicatrices de fuego, según lo establecido por Baisan y Swetnam (1990):

- Inicio de la estación (E): la cicatriz se ubicó en el primer tercio del anillo de crecimiento, correspondiente al leño temprano, justo después del límite del anillo previo. Ésto indica que el fuego fue en primavera (octubre-noviembre-diciembre).
- Mitad de la estación (M): la cicatriz se ubicó en el segundo tercio del anillo de crecimiento, indicando que el fuego se produjo al comienzo del verano (enero y febrero)
- Final de la estación (L): la cicatriz se ubicó en el tercer tercio del anillo de crecimiento, es decir al final del leño temprano o en el leño tardío. Una cicatriz clasificada de esta manera indica que el fuego ocurrió al final del verano o comienzos de otoño (marzo y abril).
- Receso vegetativo (D): la cicatriz se localizó entre el límite del leño tardío de un anillo y el comienzo del leño temprano del anillo siguiente. De esta manera, correspondería al período entre mayo y septiembre.
- Indeterminada (U): la posición de la cicatriz en el anillo de crecimiento no fue clara y por lo tanto no pudo establecerse su estacionalidad.

Dado que un árbol debió sufrir una herida para registrar la ocurrencia de fuegos, los anillos fueron identificados como "registradores" o "no-registradores" en función de la ubicación cronológica posterior o previa a la primera cicatriz. Los anillos registradores representan el período de años en el que un árbol puede registrar los incendios después de la cicatrización inicial. Por el contrario, los anillos no registradores son aquellos formados antes de la cicatrización, luego que las heridas basales se han cicatrizado por completo o posterior a su degradación por deterioro o erosión. De esta manera, un árbol puede ser clasificado como registrador o no registrador en función de la condición de sus anillos en un momento determinado. Este criterio de clasificación permite que los datos de historia de fuegos sean modelados con mayor precisión por una distribución estadística y validar aún más los análisis posteriores (Grissino-Mayer 2001).

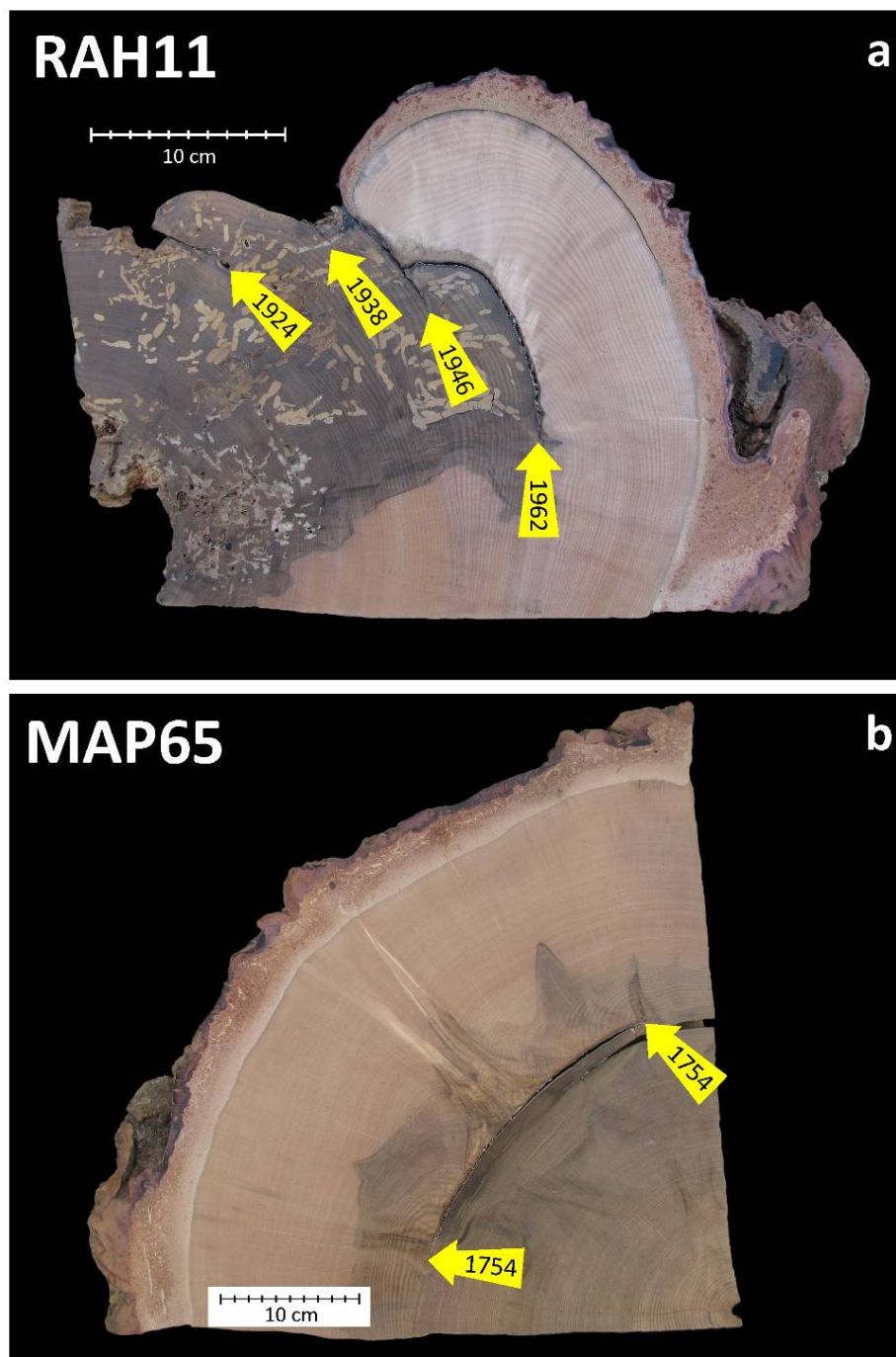


Figura 3.3 Fotografías de secciones transversales de *A. araucana* con cicatrices de fuego. a) Sección parcial con múltiples cicatrices (4 eventos). b) Porción de sección completa con una única cicatriz cerrada. Esta última muestra se obtuvo de un rollizo de *A. araucana* localizado en el aserradero Yuco S.A. (Junín de los Andes). Las flechas amarillas señalan fechas de incendios datadas dendrocronológicamente.

3.2.3 Estadísticos de los datos de historia de incendios

Luego de cofechar las muestras, se confeccionaron las cronologías maestras de fuegos o intervalos compuestos por sitio que consisten en un listado cronológico de todas las fechas de fuego por series individuales para un área dada (Romme 1980). Dieterich (1980) fue el primero en describir el uso de gráfico de intervalos compuestos de fuegos. Estos gráficos consisten en líneas horizontales que representan los árboles muestreados donde las marcas verticales denotan los años cuyos anillos de crecimiento contienen cicatrices de fuego dendrocronológicamente datadas (Grissino-Mayer 2001). En la parte inferior de estos gráficos se desarrolla la cronología compuestas de fuego de cada sitio en función de los filtros establecidos. Para realizar este análisis, se utilizó el programa FHX2 (Grissino-Mayer 1995, 2001), que permitió confeccionar estos gráficos y obtener los siguientes estadísticos: intervalo medio de fuego compuesto (IMF compuesto), intervalo medio de fuego puntual (IMF puntual) e intervalo de probabilidad mediana de Weibull (WMPI, sigla en inglés).

El IMF es el número promedio de años entre eventos de incendios sucesivos (Romme 1980). En otros términos, el IMF representa el intervalo promedio libre de incendios. Debido a que no todos los fuegos que se dan en un área cubren el área completa, es necesario discriminar entre IMF en un punto o puntual (registrado por una misma muestra o árbol) del IMF compuesto (Dieterich 1980) o intervalo entre fuegos registrados por cualquier muestra o árbol del área. El IMF puntual describe la recurrencia de fuegos en un punto mientras que el IMF compuesto la describe en relación a un área determinada (Kitzberger et al. 2000). El IMF puntual se calculó considerando solamente las muestras con cicatrices múltiples.

Dado que el IMF tiende a distribuirse en forma no normal con sesgo positivo (Baker 1989), la distribución de IMF se suele ajustar a funciones más flexibles como la de Weibull en su forma de densidad de probabilidades. El WMPI es el intervalo de fuego asociado con la probabilidad que separa el 50% de los intervalos mayores y menores a este valor, por lo que es usado como medida de la tendencia central (Kitzberger et al., 2000). Dado que esta distribución provee flexibilidad y ajuste óptimo para los *outliers*, que son en general excluidos de los análisis estadísticos, esta función brinda inferencia estadística precisa y validez a los datos

de historia de incendios (Grissino-Mayer 2001). Se aplicaron test de Kolmogorov-Smirnov para evaluar si la distribución de intervalo de fuegos correspondió al tipo Normal o de Weibull (Grissino-Mayer 1995).

A todas las cronologías maestras de incendios por sitio se les aplicó filtros. De esta manera, se analizaron todos los eventos y aquellos que estuvieran presentes en dos o más árboles que representaron $\geq 10\%$ de los individuos registradores para cada incendio. Estos filtros están diseñados para ayudar en la identificación de años de fuego que pudieron haber sido particularmente extensos en el sitio y asumen que a medida que aumenta el número de cicatrices por evento, mayor es el área quemada en el sitio (Grissino-Mayer 1995). Cabe aclarar que esta afirmación no es siempre cierta, pudiendo existir incendios severos en el pasado que están representados por pocas muestras debido a que fuegos más actuales pudieron eliminar progresivamente evidencias antiguas (González et al. 2005).

A modo de síntesis se unieron los registros de sitio por grupos Mésico y Estepario en función de su localización dentro de las áreas definidas en el capítulo anterior por sus patrones de crecimiento (ver Capítulo 2). Además, se unieron todos los registros de sitios en forma regional. En cada caso se confeccionaron cuatro cronologías de acuerdo a los siguientes filtros de incendios: todos los eventos, todos los incendios en dos o más sitios, los fuegos registrados en dos o más cicatrices en al menos el 10% de los registradores por sitio y por último esta última condición pero en dos o más sitios.

Con el objetivo de analizar si existieron cambios en la recurrencia de incendios durante todo el horizonte temporal analizado (en cada sitio, por grupos Mésico y Estepario y a nivel regional), se compararon los estadísticos en dos subperíodos definidos por los 72 años anteriores y posteriores a la creación del Parque Nacional Lanín. El inicio de la primera etapa fue definida considerando un mínimo de dos muestras que registraran un incendio y que existiera para ese mismo año al menos cuatro series registradoras, y el final en 1936, un año antes de la creación del Parque Nacional Lanín. El segundo periodo se inició en 1937. Estos cambios temporales fueron comparados estadísticamente mediante tests de t de Student (diferencia de medias).

3.2.4 *Relación de los fuegos con variables climáticas*

Los análisis de épocas superpuestas (SEA, por su acrónimo en inglés) constituyen herramientas poderosas para analizar la influencia que tienen ciertas variables en forma previa, durante y después de ciertos eventos (Swetnam 1993). En este estudio, como en otros de historia de incendios, los SEA fueron utilizados con el objetivo de analizar la influencia del clima sobre la ocurrencia de incendios en años previos, durante y después de estos eventos. Debido a la ausencia de registros climáticos que cubran la totalidad de los años detectados en las historias de incendio de cada sitio, se utilizaron las diferentes cronologías de referencias desarrolladas próximas a los sitios muestreados. Estas series constituyeron *proxies* climáticos en los SEA. Por otra parte, se utilizaron también reconstrucciones regionales a partir de anillos de crecimiento de la temperatura de verano desarrollada a partir de cronologías de *F. cupressoides* para el período 869-1983 AD (Villalba 1990) y de precipitaciones de noviembre-diciembre obtenida con tarugos de *A. chilensis* para el intervalo 1597-1988 (Villalba et al. 1998). Para evaluar el efecto de la actividad ENSO en la ocurrencia de incendios, se utilizaron los siguientes registros: reconstrucción de Índice de la Oscilación Sur (SOI por su acrónimo en inglés) de invierno a partir de anillos de crecimiento para el período 1706-1977 (Stahle et al. 1998), valores observados del SOI para los meses de diciembre a febrero entre 1876-1998 (Allan et al. 1996), reconstrucción de la temperatura del mar (SST) de Cook para los meses de diciembre a febrero en la zona Niño 3 a partir de anillos de crecimiento entre 1408 y 1978 (D'Arrigo et al. 2005) y reconstrucción de la temperatura del mar (SST) para la zona Niño 3.4 entre 1871 y 2000 (Trenberth y Stepaniak 2001). En el caso de la AAO o SAM, se emplearon una reconstrucción de este índice realizada por Fogt (Jones et al. 2009) y otra de la presión a nivel del mar entre los 50°-60° S en los alrededores de la Antártida (Villalba et al. 1997). Los valores de cada uno de los registros en ventanas de 11 años (5 años antes y después de los eventos) fueron expresados como desvíos de la media de esos períodos en cada caso. A pesar que el clima en años $t + 1$, $t + 2$, etc. no ejerce ninguna influencia sobre un fuego en el año t , los análisis que incluyen estos años pueden ayudar a detectar importantes patrones climáticos previos y posteriores a los años de incendios (Grissino-Mayer 2001). Estos desvíos para cada una de las

ventanas de 11 años (una por evento de incendio) fueron superpuestos y promediados. Técnicas de simulación de Monte Carlo fueron utilizadas para evaluar la significancia estadística. De esta manera, se realizaron 1.000 simulaciones por muestreo aleatorio con reemplazo para determinar la probabilidad asociada con los desvíos promediados para los años clave (Mooney y Duval 1993). Todos los SEA fueron realizados con el programa libre EVENT versión 6.02P (<http://www.ltrr.arizona.edu/software.html>). En todos los análisis las diferencias significativas fueron consideradas para un nivel de $\alpha = 0.05$.

A excepción de la reconstrucciones de temperatura y de precipitaciones tomadas de Villalba (1990) y Villalba et al. (1998) respectivamente y de SAM de Fogt (Jones et al. 2009), los restantes registros se obtuvieron de la base de datos del World Data Center for Paleoclimatology de la NOAA (<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/recons.html>).

3.3. RESULTADOS

3.3.1 *Análisis de las cronologías a nivel de sitio*

En general, el tamaño promedio de los árboles muestreados en este estudio no presentó gran variabilidad entre todos los sitios analizados (Tabla 3.2). Por otra parte, considerando el tamaño de las cicatrices en función de la altura alcanzada sobre los fustes de los árboles, los mayores valores se observaron en Ruka Choroy, Ñorquinco y Nahuel Mapi. Por el contrario, los menores tamaños se registraron en Tromen y Pinalada Redonda.

Resulta de importancia destacar que se pudo datar el 78 % (193) del total de las muestras consideradas en este estudio (246). El 21% del total de las muestras que no se pudo cofechar, se debió a la presencia de “paquetes” de anillos angostos, avanzada pudrición y poca claridad en las marcas de incendio. El fuego más antiguo fue datado para el año 1441 en el sitio de Nahuel Mapi. El registro de este sitio también resultó el de mayor recurrencia de incendios en comparación al resto de los sitios. Por el contrario, el fuego más reciente fue datado en Paso del Arco para el año 2005. En el Apéndice I (ver sección Apéndices) se presentan todas las fechas de incendios por sección parcial que pudieron ser cofechadas. Además, en el Apéndice II se

presentan los resúmenes de incendios por sitio, los números de cicatrices y de árboles registradores por evento, además del cálculo de intervalos de fuegos entre fechas.

Tabla 3.2 Información resumen de las cronologías de incendios (ver Tabla 3.1 por el detalle de los códigos).

Código de sitio	DAP (cm)	Alt. de cic. (m)	Nº de muestras datadas	Incendios datados		Años con cicatrices
				Primero	Último	
CAV	95±8	2,22±0,45	7	1824	1993	12
PAR	101±7	2,07±0,33	17	1710	2005	19
REM	97±6	2,80±0,37	19	1822	1986	18
NOR	89±4	3,44±0,33	31	1802	1998	27
RUC	89±4	3,65±0,38	19	1836	1940	10
MIN	98±3	2,67±0,23	27	1831	1935	23
PIN	86±7	1,81±0,26	14	1841	1967	10
RAH	92±4	3,00±0,44	19	1811	2003	16
MAP	98±5	3,40±0,65	24	1441	1999	45
TRO	90±7	1,54±0,24	16	1762	1995	21

DAP: Diámetro a 1,3 m de altura; Alt. de cic.: altura de la cicatriz en el árbol; Nº de muestras. datadas: número de muestras datadas en cada sitio. En DAP y Alt. de cic. se presentan los valores promedios ± error estándar de la media.

En promedio de todos los sitios, aproximadamente la mitad de las muestras correspondió al tipo simple (95) y la mitad restante a múltiples, estando esta categoría representada principalmente por muestras de dos cicatrices (63). La muestra TRO17 del sitio de Paso Tromen tuvo el mayor registro de incendios, totalizando nueve eventos.

Teniendo en cuenta la orientación de las cicatrices en los árboles por sitio, en la mayoría de los casos se observó que la mayor frecuencia de las mismas se registró pendiente arriba (Fig. 3.4). Solamente en Pinalada Redonda y en Rahue se observó una tendencia diferente.

En la mayoría de las cicatrices no se logró determinar con claridad la estacionalidad de las mismas por sitio (Fig 3.5), alcanzando la categoría U en promedio el 70% de todas las cicatrices. En aquellos casos en que se pudo diferenciar la posición de la cicatriz dentro del anillo, mayoritariamente los incendios se clasificaron como tipo E (63%) y luego como M (29%). Solamente se encontraron ocho cicatrices dentro de la categoría L y apenas dos cicatrices durante el receso vegetativo en Minchén.

En los diez sitios de bosques de *A. araucana* se observó que el IMF compuesto varió entre 5 y 16,3 años en aquel período en el cual se tuvo al menos cuatro series registradoras de incendios y al menos dos cicatrices en el primer incendio de cada cronología compuesta para todos los eventos (Tabla 3.3). En el caso de fuegos de mayor magnitud (eventos en los que se dataron como mínimo en dos cicatrices en al menos el 10% de los árboles registradores), el IMF compuesto osciló entre 8,9 y 32 años. En todos los sitios, los IMF compuestos se ajustaron mejor a una distribución de Weibull que a una de tipo Normal, como fue determinado por tests de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov. El WMPI siempre presentó valores más bajos que el IMF. Como era esperable, los intervalos máximos y mínimos entre fuegos consecutivos fueron generalmente mayores para años de grandes incendios en comparación a los registros que incluyeron todas las fechas. Sin embargo, Pinalada Redonda resultó el único caso en el que los fuegos de mayor extensión se produjeron en forma más frecuente.

Considerando los IMF puntuales, es decir, aquellos eventos registrados en cicatrices múltiples, se observaron mayores valores en todos los estadísticos en comparación a cuando no se filtraron las fechas de incendios (Tabla 3.4). De otro modo, la recurrencia de fuegos en un árbol que sufrió un incendio, en promedio, es menor que cuando se analizan todos los individuos del rodal.

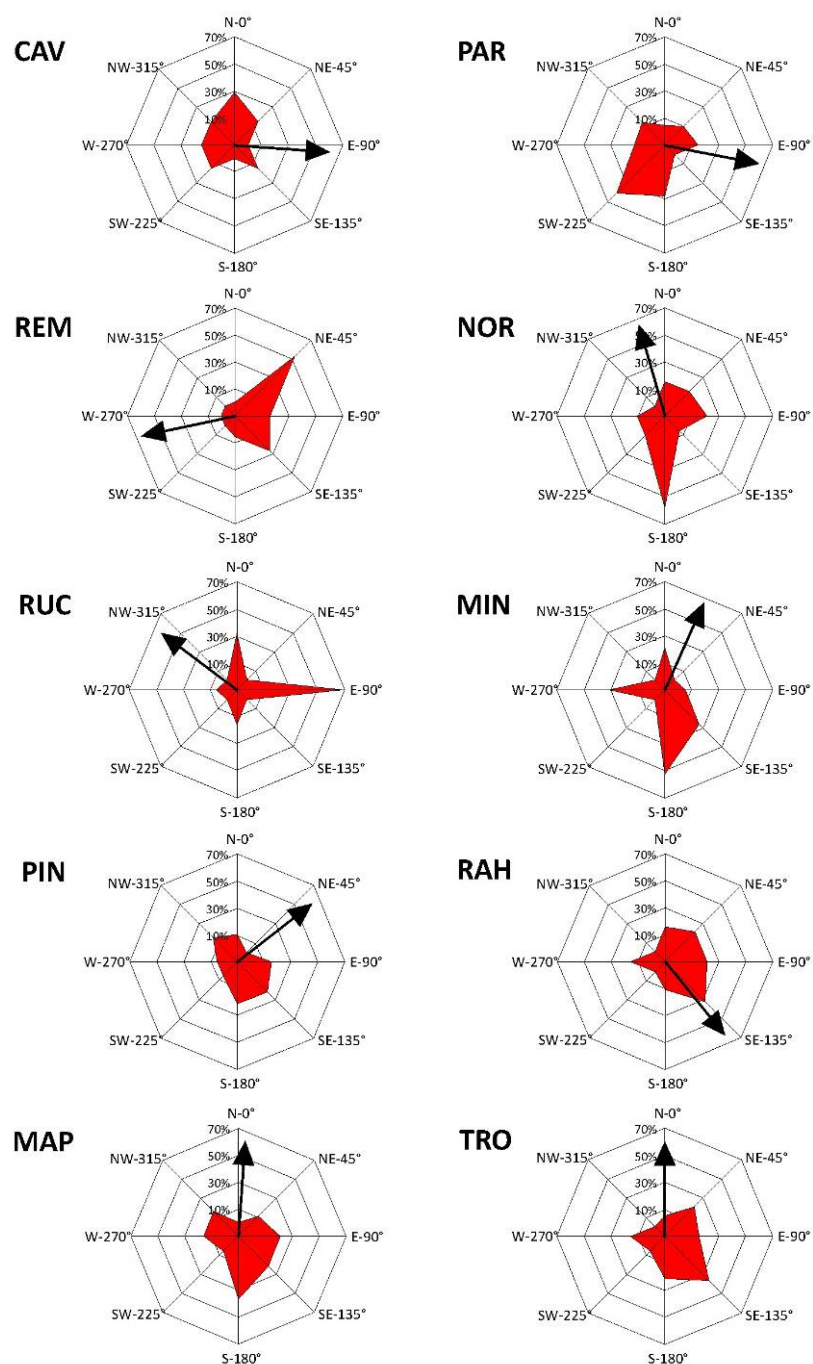


Fig 3.4 Frecuencias de orientación (en porcentaje) de las cicatrices por sitio (ver Tabla 3.1 por el detalle de los códigos). Las flechas indican la pendiente predominante en cada sitio.

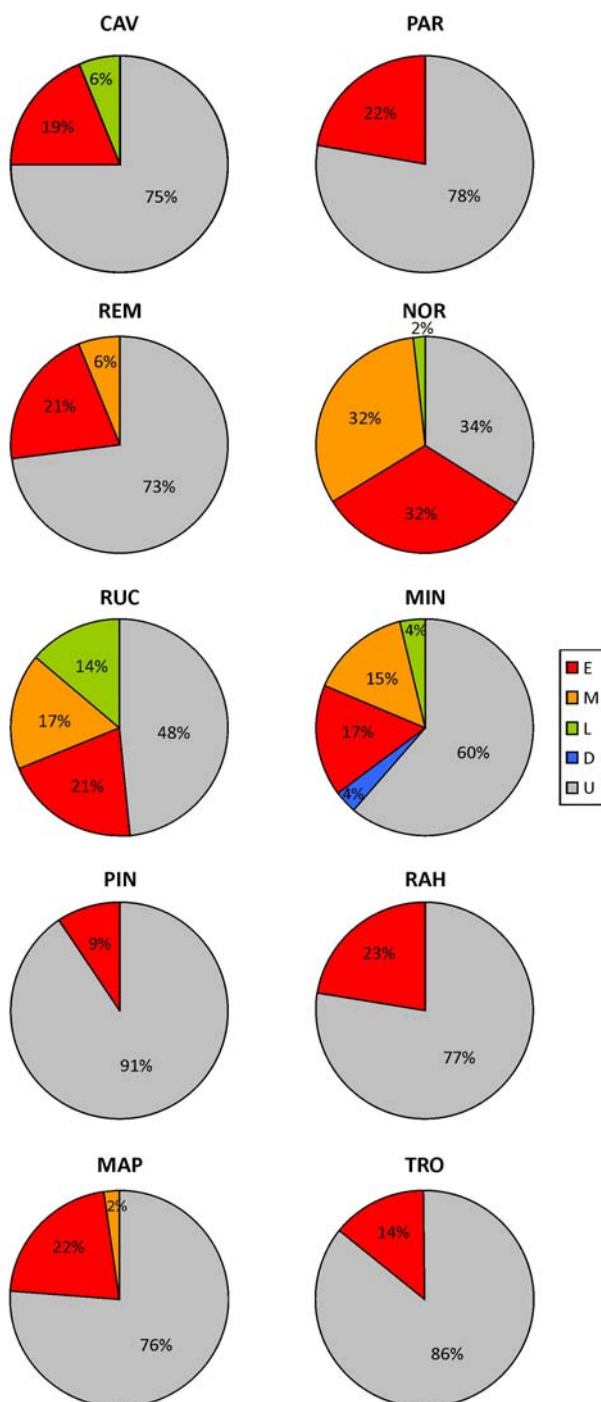


Fig 3.5 Análisis estacional de las cicatrices por sitio (ver Tabla 3.1 por el detalle de los códigos). U: no identificable; D: en el receso vegetativo; E: en el primer tercio del anillo; M: en el segundo tercio del anillo; L: en el tercer tercio del anillo o en el leño temprano.

Tabla 3.3 Estadísticos de intervalos de fuegos considerando como inicio al incendio más antiguo con dos o más series con marca de incendio y con un mínimo de cuatro series registradoras. Los estadísticos se calcularon para todos los incendios y para aquellos eventos que afectaron al menos 10% de los árboles registradores (ver Tabla 3.1 por el detalle de los códigos).

Sitio	Período	Filtros	WMPI (años)	IMF (años)	SD	nº de int.	Int. Máx.	Int. Mín.
CAV	1944-2006	Todos	16,4	16,3	6,1	3	23	11
		≥10%	...	...	...	...	...	...
PAR	1862-2007	Todos	8,9	11,9	13,0	12	46	3
		≥10%	19,8	29,0	29,7	4	66	4
REM	1846-2007	Todos	8,3	9,3	6,2	15	20	1
		≥10%	16,2	23,3	28,1	6	78	4
NOR	1827-2006	Todos	5,8	7,1	5,9	24	24	1
		≥10%	10,1	22,7	32,9	7	92	1
RUC	1836-2006	Todos	8,5	11,6	11,0	9	31	1
		≥10%	16,1	20,8	15,3	5	37	1
MIN	1836-2006	Todos	4,0	5,0	4,3	20	15	1
		≥10%	7,0	8,9	8,2	8	27	1
PIN	1859-2006	Todos	9,6	13,5	16,1	8	50	3
		≥10%	8,3	9,6	8,0	5	23	3
RAH	1891-2006	Todos	4,4	5,3	4,9	21	23	1
		≥10%	15,6	13,7	10,7	5	27	3
MAP	1722-2006	Todos	7,6	8,7	6,1	32	21	2
		≥10%	30,1	32,0	20,0	5	64	14
TRO	1824-2006	Todos	7,9	10,1	9,7	17	34	2
		≥10%	26,0	27,8	16,4	6	47	7

WMPI: intervalo de probabilidad mediana de Weibull, IMF: intervalo medio de fuego; SD: desvío estándar; nº de int.: número de intervalos; Int. Máx.: intervalo máximo; Int. Mín.: intervalo mínimo.

....: indica que no hubo intervalos suficientes para realizar los cálculos.

Tabla 3.4 Intervalos de fuegos puntuales por sitio considerando como inicio al incendio más antiguo con dos o más series con marca de incendio y con un mínimo de cuatro series registradoras (ver Tabla 3.1 por el detalle de los códigos)

Sitio	Período	WMPI (años)	IMF (años)	SD	nº de int.	Int. Máx.	Int. Mín.
CAV	1944-2006	16,4	16,3	6,1	3	23	11
PAR	1862-2007	13,8	16,9	15,0	8	46	4
REM	1846-2007	10,3	10,8	5,9	13	20	4
NOR	1827-2006	7,0	8,6	6,9	20	29	1
RUC	1836-2006	6,9	9,1	8,8	8	26	1
MIN	1836-2006	4,2	5,2	4,4	19	15	1
PIN	1859-2006	8,3	9,6	8,0	5	23	3
RAH	1891-2006	4,9	6,2	5,8	18	23	1
MAP	1722-2006	8,9	10,3	7,3	27	27	2
TRO	1824-2006	9,6	12,2	10,9	14	34	2

WMPI: intervalo de probabilidad mediana de Weibull, IMF: intervalo medio de fuego; SD: desvío estándar; nº de int.: número de intervalos; Int Máx.: intervalo máximo; Int. Mín.: intervalo mínimo.

Al comparar las cronologías de fuego para el período común 1867-2006, se observó que el intervalo medio de todos los eventos sin importar su magnitud fluctuó entre 5,6 y 14,3 y el WMPI entre 4,4 y 9,9 años (Tabla 3.5). Teniendo en cuenta aquellos fuegos de mayor magnitud (con cicatrices en al menos 10% de los árboles registradores) el IMF varió entre 5.0 y 35,0 mientras que el WMPI lo hizo entre 4,1 y 34,2. En ambos estadísticos los menores valores se encontraron en Minchén mientras que los máximos valores para todos los fuegos se hallaron en Pinalada Redonda y para los de mayor magnitud en Tromen. Solamente en Minchén y Pinalada Redonda los IMF y WMPI fueron menores en los fuegos de mayor magnitud en comparación cuando se analizaron todos los eventos. Los sitios de Caviahue y Rahue no pudieron ser incluidos en este análisis ya que el incendio más antiguo con dos o más series con marca de incendio y con un mínimo de cuatro series registradoras en ambos casos fue posterior a 1867 (Tabla 3.3).

Tabla 3.5 Intervalos de fuegos por sitio para el período común 1867-2006 y los subperíodos 1867-1936 y 1937-2006 (ver Tabla 3.1 por el detalle de los códigos)

Sitio	Período	Filtros	WMPI (años)	IMF (años)	SD	n° de int.	Int. Máx.	Int. Mín.
PAR	1867-2006	Todos	9,0	12,3	13,6	11	46	3
		≥ 10%	14,3	25,3	35,2	3	66	4
	1867-1936	Todos	6,1	8,4a	10,4	5	27	3
		≥ 10%	...	...	...	...	...	...
	1937-2006	Todos	8,8	9,4a	6,2	5	20	4
		≥ 10%	...	...	...	...	...	...
REM	1867-2006	Todos	7,6	8,6	5,9	13	20	1
		≥ 10%	14,0	22,4	31,3	5	78	4
	1867-1936	Todos	6,0	6,9a	5,0	9	17	1
		≥ 10%	8,3	8,5	4,4	4,0	14	4
	1937-2006	Todos	13,8	14a	7,2	3	20	6
		≥ 10%	...	...	...	...	...	...
NOR	1867-2006	Todos	6,3	7,9	6,8	16	24	1
		≥ 10%	7,2	23,0	32,9	5	92	1
	1867-1936	Todos	4,3	5,2a	4,2	11	13	1
		≥ 10%	3,2	5,8	8,2	4	18	1
	1937-2006	Todos	14,6	15,3b	8,5	4	24	5
		≥ 10%	...	...	...	...	...	...
RUC	1867-2006	Todos	6,8	9,9	11,1	7	31	1
		≥ 10%	12,5	17,3	15,1	4	37	1
	1867-1936	Todos	4,9	6,3	6,5	6	19	1
		≥ 10%	7,9	10,7	9,1	3	19	1
	1937-2006	Todos	...	...	...	...	...	...
		≥ 10%	...	...	...	...	...	...

WMPI: intervalo de probabilidad mediana de Weibull, IMF: intervalo medio de fuego; SD: desvío estándar; n° de int.: número de intervalos; Int Máx.: intervalo máximo; Int. Mín.: intervalo mínimo.

....: indica que no hubo intervalos suficientes para realizar los cálculos.

Letras diferentes indican diferencias significativas ($\alpha = 0,05$)

Tabla 3.5 *Continuación*

Sitio	Período	Filtros	WMPI (años)	IMF (años)	SD	nº de int.	Int. Máx.	Int. Mín.
MIN	1867-2006	Todos	4,4	5,6	4,9	12	15	1
		≥ 10%	4,1	5,0	4,9	3	10	1
	1867-1936	Todos	4,4	5,6	4,9	12	15	1
		≥ 10%	4,1	5,0	4,6	3	10	1
	1937-2006	Todos	...	...	...	...	...	...
		≥ 10%	...	...	...	...	...	...
PIN	1867-2006	Todos	9,9	14,3	17,2	7	50	3
		≥ 10%	8,3	10,0	9,2	4	23	3
	1867-1936	Todos	7,5	9,0	8,3	5	23	3
		≥ 10%	8,3	10,0	9,2	4	23	3
	1937-2006	Todos	...	...	...	...	...	...
		≥ 10%	...	...	...	...	...	...
MAP	1867-2006	Todos	6,0	7,2	6,1	18	21	2
		≥ 10%	...	...	...	...	...	...
	1867-1936	Todos	4,6	5,0a	3,1	13	13	2
		≥ 10%	...	...	...	...	...	...
	1937-2006	Todos	9,2	10,8a	8,4	4	19	3
		≥ 10%	...	...	...	...	...	...
TRO	1867-2006	Todos	7,4	9,1	8,7	12	34	2
		≥ 10%	34,2	35,0	19,1	3	47	13
	1867-1936	Todos	6,9	7,5a	4,7	6	15	2
		≥ 10%	...	...	...	...	...	...
	1937-2006	Todos	7,9	11,0a	13,2	5	34	3
		≥ 10%	...	...	...	...	...	...

En un análisis comparativo por subperíodos de 70 años (1867-1936 en relación a 1937-2006), en Paso del Arco, Remeco, Nahuel Mapi y Tromen los IMF para todos los eventos sin importar su magnitud aumentaron en el segundo período aunque en forma no significativa

(Tabla 3.5). Es decir, hubo menor recurrencia de incendios entre 1937 y 2006 en esos sitios. Ñorquinco fue el único sitio en el que el aumento del IMF en el segundo período fue significativo. En Ruka Choroy, Minchén y Pinalada Redonda no fue posible realizar esta prueba de medias ya que los intervalos en el segundo período no fueron suficientes. De otro modo, entre 1937 y 2006 ocurrieron muy pocos incendios en esos sitios. Es importante destacar que Paso Tromen y Ñorquinco fueron los únicos dos sitios dentro del Parque Nacional Lanín en los que se pudo hacer comparaciones por subperíodos ya que ocurrieron suficientes fuegos entre 1937 y 2006 para permitir tal análisis.

3.3.2 Análisis de las cronologías: patrones temporales

Los patrones temporales de ocurrencia de incendios exhibieron consistencia regional como así también diferencias entre sitios (Fig. 3.6 y 3.7). Sin embargo, en general, la mayor cantidad de registros de incendios quedó concentrada entre fines del siglo XVIII y comienzos del XX. Al considerar todos los registros de incendios y analizar la magnitud de los mismos en términos de cantidad de cicatrices por año, se observó que en siete oportunidades (1871, 1874, 1891, 1897, 1909, 1944 y 1986) se registraron fuegos en más de 10 árboles, siendo 1986 el que mayor número de muestras presentó (15), principalmente en Ñorquinco (13).

Gráficamente también fue posible observar, en aquellos registros suficientemente largos, que la ocurrencia de incendios durante el siglo XIX fue mayor al siglo XVIII tanto en su expresión por sitios como en su forma regional y por subgrupos de sitios mésicos y esteparios (Fig. 3.7). Ésto se observó más claramente para los fuegos de mayor magnitud (aquellos que ocurrieron en años en los que coincidieron al menos dos cicatrices correspondientes en al menos el 10% de los árboles registradores) (Fig. 3.7b). La incidencia de fuegos en el área de estudio disminuyó en el siglo XX, lo cual también se distinguió con mayor claridad en los fuegos de mayor magnitud (Fig. 3.7a y b). En las cronologías mésicas (a excepción de Remeco, todas ubicadas dentro del PN Lanín), la mayor presencia de fuegos de mayor magnitud entre 1825 y comienzos del siglo XX fue mucho más acentuada en comparación a aquellas cronologías de condición esteparia en donde se observó una tendencia de aumento en este tipo de eventos desde el siglo XVIII hasta 1980.

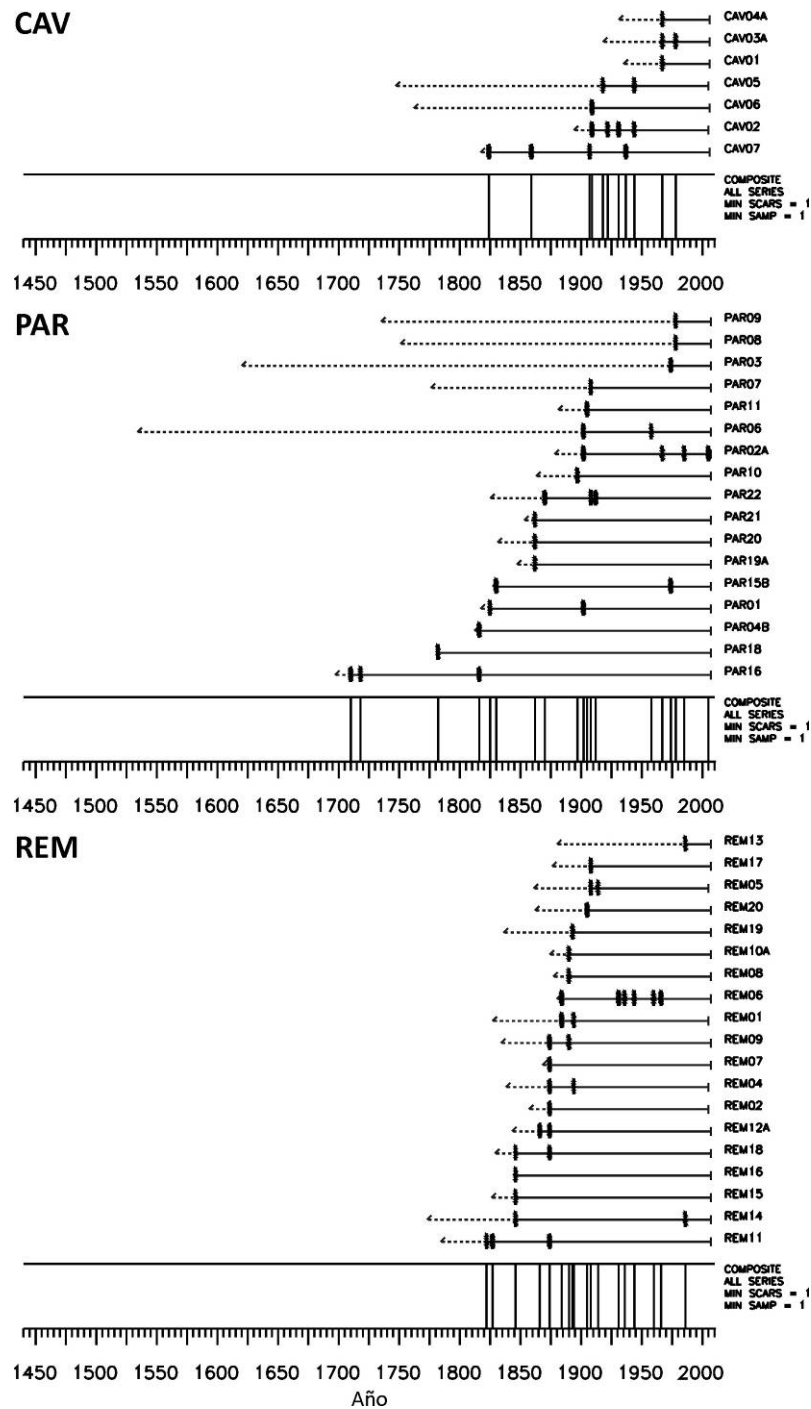
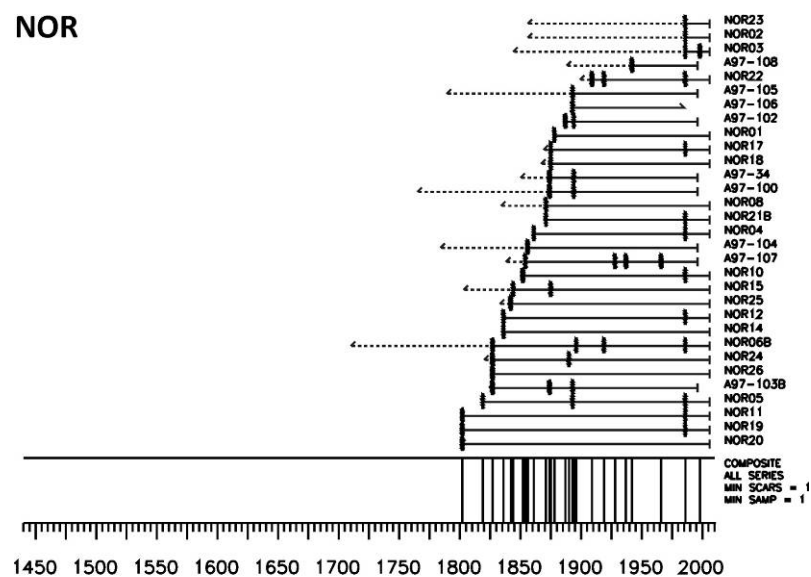


Fig 3.6 Cronologías de incendios por sitio generadas con el programa FHX2 (ver Tabla 3.1 por el detalle de los códigos). Las líneas horizontales representan la cobertura temporal de cada árbol. Las líneas verticales representan los incendios datados. En la parte inferior de cada gráfico se presenta la cronología compuesta del sitio incluyendo todos los eventos.

NOR



RUC

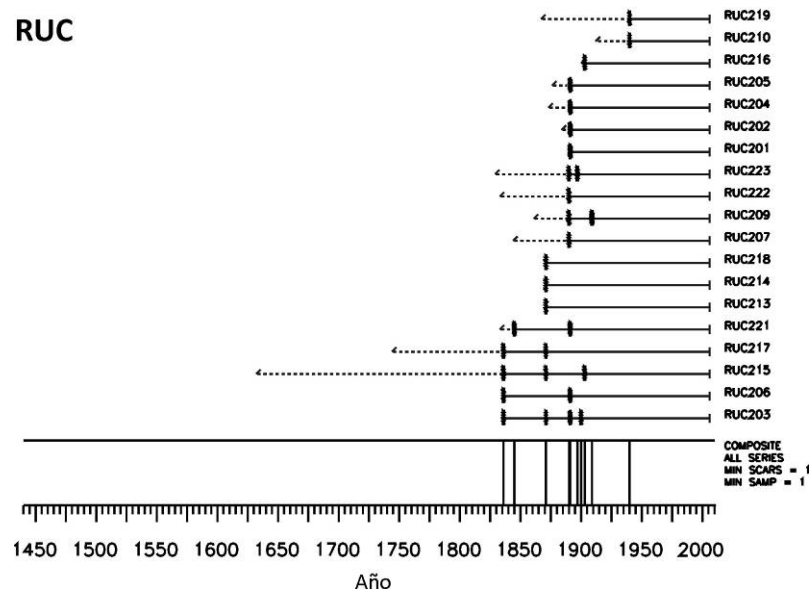


Fig 3.6 Continuación.

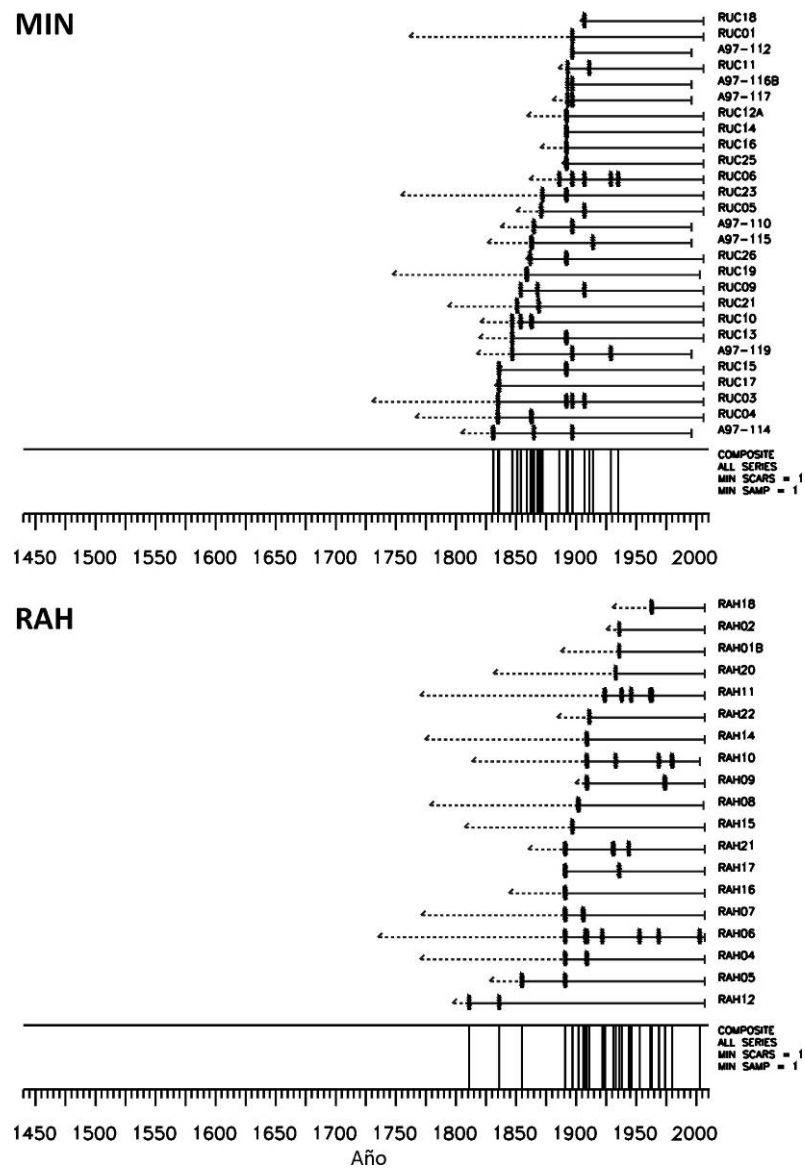


Fig 3.6 *Continuación.*

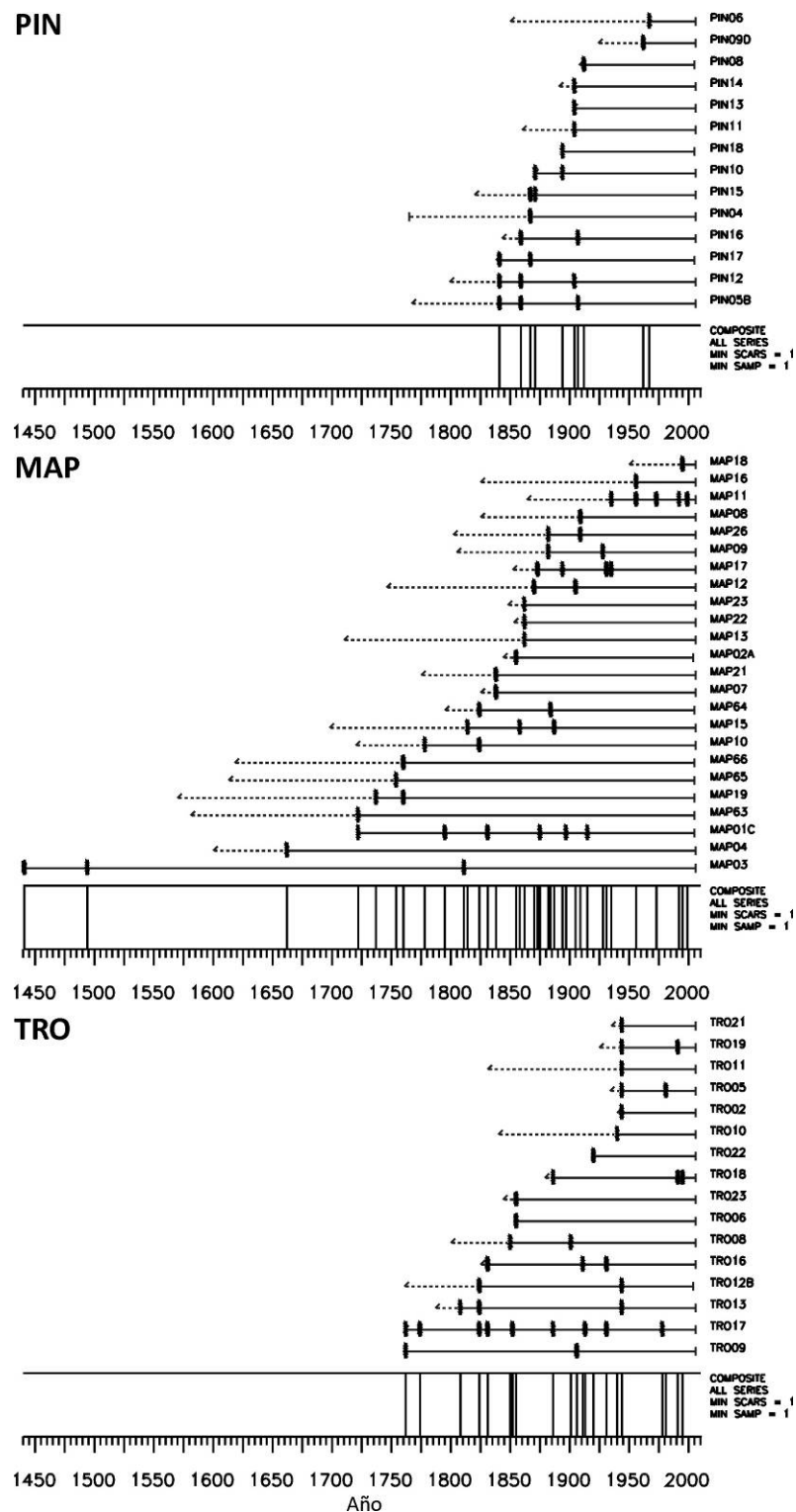


Fig 3.6Continuación.

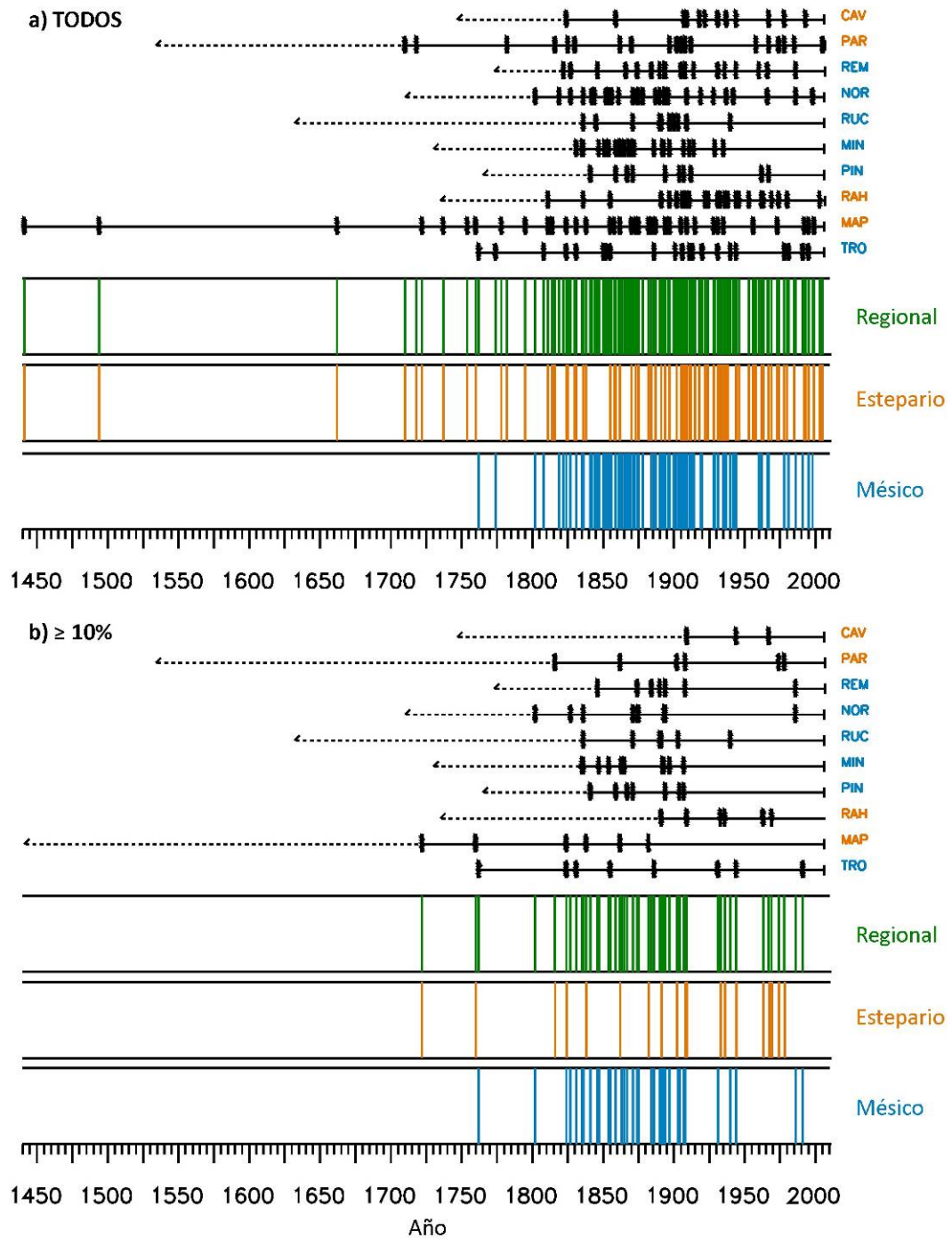


Fig 3.7 Registros compuestos de incendio a nivel Regional y por subgrupos Estepario y Mésico para (a) todos los eventos y (b) para aquellos incendios registrados como mínimos en dos cicatrices correspondientes al menos el 10% de los árboles registradores. Cada línea horizontal representa el registro temporal de cada sitio con sus correspondientes fechas de incendios (marcas verticales).

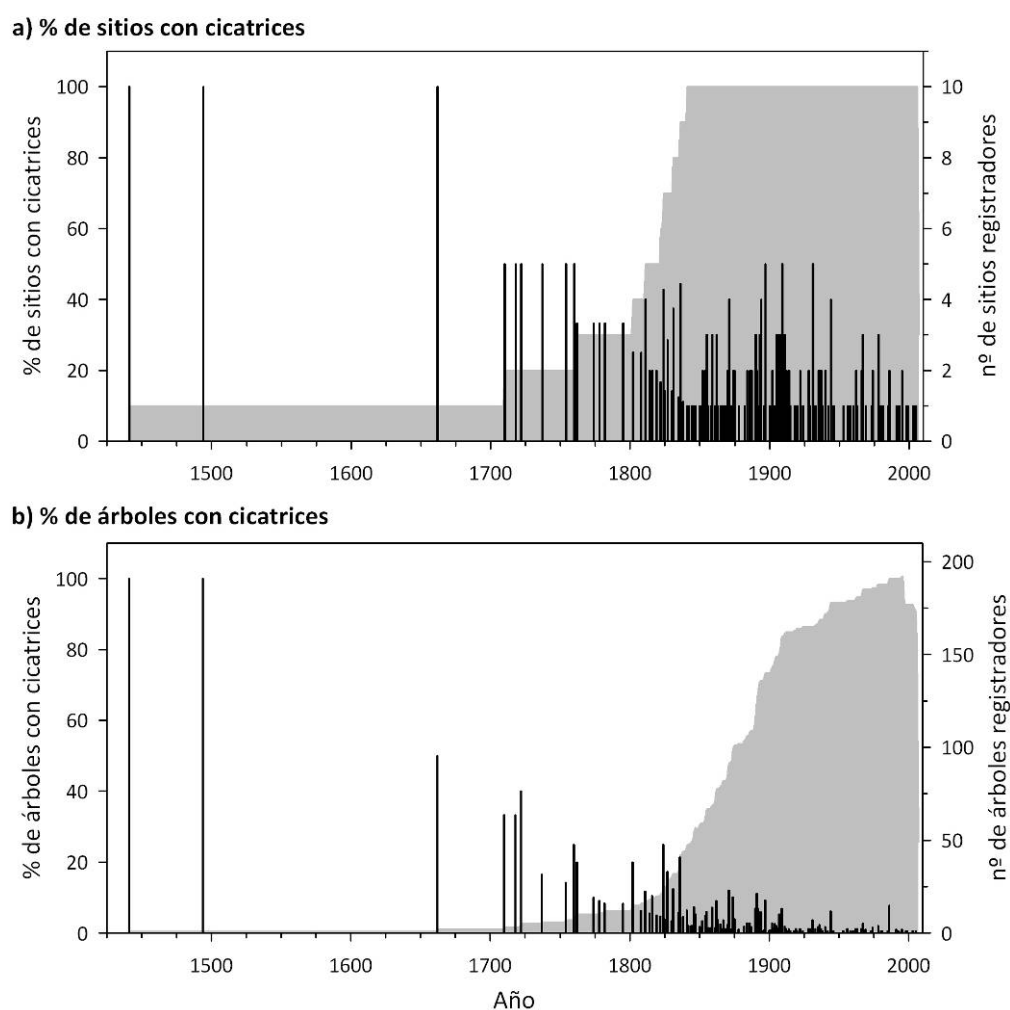


Fig 3.8 Porcentajes anuales de sitios con cicatrices (a) y de muestras (árboles registradores) con cicatrices (b). Las áreas grises indican el número de sitios con árboles registradores vivos (a) y el número total de árboles registradores vivos por año (b).

Se observó la ocurrencia sincrónica de fuego en los mismos años en numerosos sitios dentro del área de estudio (Figs. 3.7, 3.8 y 3.9). Por ejemplo, en los años 1897, 1909 y 1931 se encontraron 5 sitios con cicatrices de fuego, lo cuales correspondieron al 50% de los sitios registradores en esas fechas (Fig. 3.9).

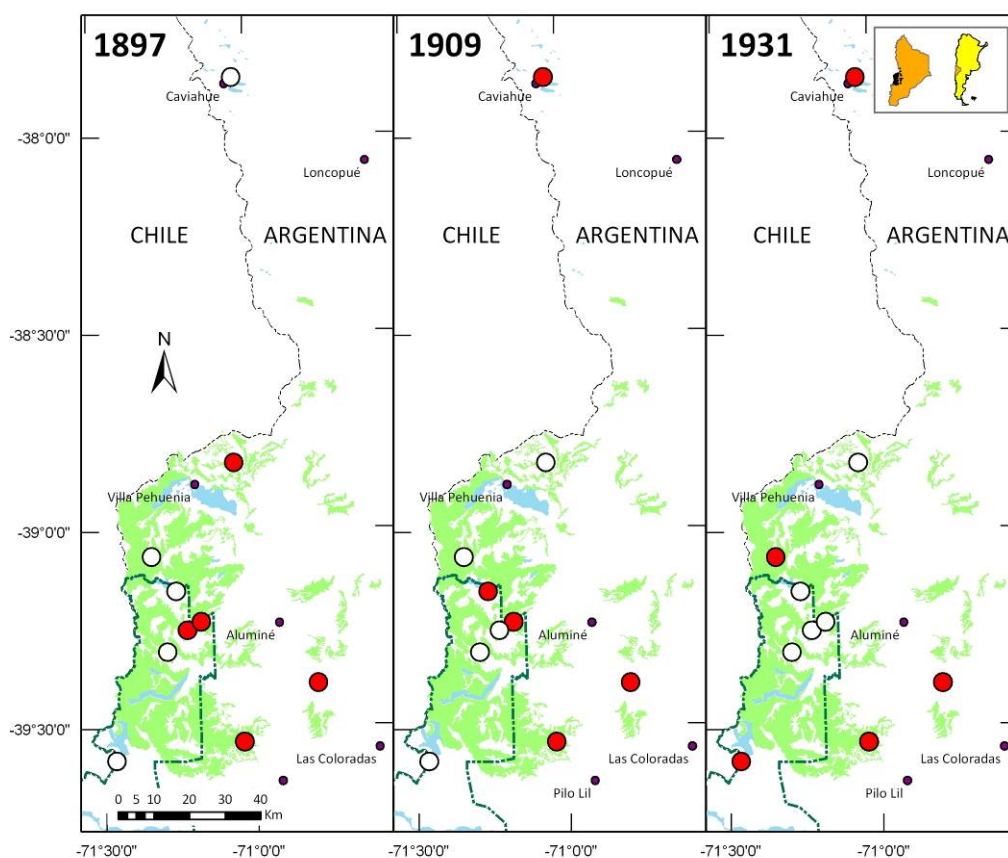


Fig 3.9 Mapas con los sitios que registraron fuegos en los años 1897, 1909 y 1931 (círculos rojos). Los círculos blancos indican sitios que tenían árboles registradores en las respectivas fechas pero que no evidenciaron incendios.

3.3.3 Relación de los fuegos con variables climáticas a nivel de sitio

En los análisis de épocas superpuestas, y utilizando a la cronología regional standard como variable “proxy” climática, solamente se encontró una señal clara y significativa de bajo crecimiento durante los años de ocurrencia de incendios en los sitios de Ñorquínco y Pinalada Redonda (Fig. 3.10). En este último sitio, al considerar los fuegos de gran magnitud (como mínimo dos cicatrices en al menos el 10% de los árboles registradores) la relación dejó de ser significativa para los años de incendios. En Remeco, se halló bajo crecimiento a nivel regional para los años inmediatamente posteriores a la ocurrencia de incendios.

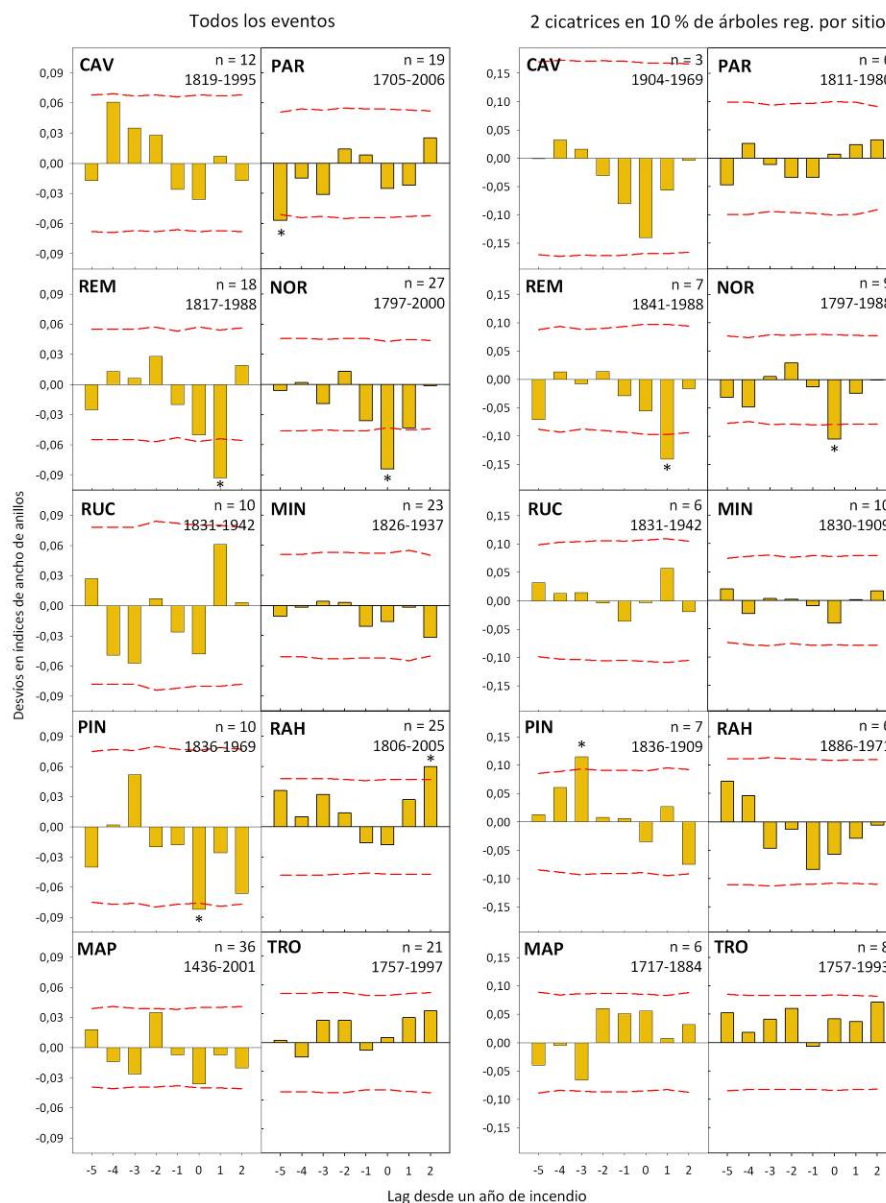


Fig 3.10 Índices promedio de anillos de crecimiento en la cronología regional standard desarrollada en el Capítulo 2 de esta tesis para los cinco años anteriores y dos posteriores a los años de incendios (año 0) en todos los sitios de muestreo para todos los eventos (columna izquierda) y para aquellos fuegos registrados como mínimo en dos cicatrices de al menos el 10% de los árboles registradores (columna derecha). Ver Tabla 3.1 por el detalle de los códigos en el ángulo superior izquierdo. Las barras con asteriscos son estadísticamente diferentes ($p < 0,05$) de valores medios determinados en 1000 simulaciones de Monte Carlo basados en el mismo número de años que de eventos (Mooney y Duval 1993). El intervalo de tiempo considerado comenzó cinco años antes que el primer evento. El número de incendios y período de tiempo considerados en cada análisis se indican en la esquina superior derecha de cada gráfico.



Fig 3.11 Índices promedios de índices de anillos de crecimiento en la cronología regional standard desarrollada en el Capítulo 2 de esta tesis para los cinco años anteriores y dos posteriores en todos los años de incendios (año 0) y en aquellos de gran magnitud a nivel Regional y por sector Estepario y México dentro del área de estudio. Las barras con asteriscos indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de valores medios determinados en 1000 simulaciones de Monte Carlo basados en el mismo número de años que de eventos (Mooney y Duval 1993). El intervalo de tiempo considerado comenzó cinco años antes que el primer evento. El número de incendios y período de tiempo considerados en cada análisis se indican en la esquina superior derecha de cada gráfico.

Al analizar todas las fechas de cicatrices de fuego a nivel regional en comparación con la cronología regional standard de *A. araucana*, desarrollada en el Capítulo 2 de esta tesis, se observó que la ocurrencia de estos eventos se relacionó significativamente con años de bajo crecimiento (Fig. 3.11). Tanto para todos los eventos como para aquellos fechados como mínimo en dos cicatrices de al menos el 10% de los árboles registradores por sitio, al aumentar

la exigencia, es decir al considerar aquellos incendios que ocurrieron en dos o más sitios, se observó que la significancia aumentó. En el caso de todos los eventos por sitio, registrados en dos o más rodales de muestreo, se observó que en promedio, dos años antes de la ocurrencia de incendios existe un alto crecimiento, aunque no significativo. Al desglosar este análisis por sectores Estepario y Mésico, se encontró que solamente en el segundo grupo los eventos allí ocurridos se correlacionaron significativamente con años de bajo de crecimiento. En el caso del grupo de sitios esteparios, no pudo encontrarse ningún tipo de patrón claro entre la ocurrencia de incendios y el crecimiento regional de la especie.

Sin embargo, las fechas de todos los incendios y de aquellos registrados como mínimo en dos cicatrices de al menos el 10% de los árboles registradores, en ambos casos en dos o más sitios para el registro regional y los grupos estepario y mésico no se hallaron relaciones congruentes con los resultados anteriores cuando se las comparó con reconstrucciones regionales de temperaturas de verano y precipitaciones de noviembre-diciembre (Fig. 3.12). En el caso de las temperaturas solamente se halló una relación negativa significativa para el registro estepario con los años previos a la ocurrencia de los incendios. Por el contrario, la relación con las precipitaciones resultó positiva y significativa solamente dos años antes de las fechas de fuego a nivel regional y al considerar el grupo Mésico. No pudieron realizarse los análisis para el grupo Estepario cuando el filtro de eventos se limitó a aquellos incendios registrados en el 10% de los árboles registradores en dos o más sitios, ya que la cantidad fechas no fue mayor a dos (Fig. 3.12).

Analizando la frecuencia de incendios para cada uno de los registros observados (Regional, Estepario y Mésico) en las cuatro combinaciones de signo de los desvíos en las reconstrucciones de temperaturas y de precipitaciones, no se hallaron diferencias significativas en comparación a lo esperado según la proporción total de años dentro del período (desde el primer fuego y el último año común entre las reconstrucciones de temperatura y precipitación) a través de tests de Chi-cuadrado (Fig 3.13). Sin embargo, cuando se consideraron solamente todos los eventos en dos o más sitios en cada uno de los registros, se encontró una mayor proporción de incendios con valores altos de temperatura y bajas precipitaciones (Regional: 34%, Estepario:

44% y México: 38%). Este tipo de eventos se llamarán de ahora en más: fuegos por causas climáticas. Al considerar los fuegos de gran magnitud, esta tendencia no fue tan clara.

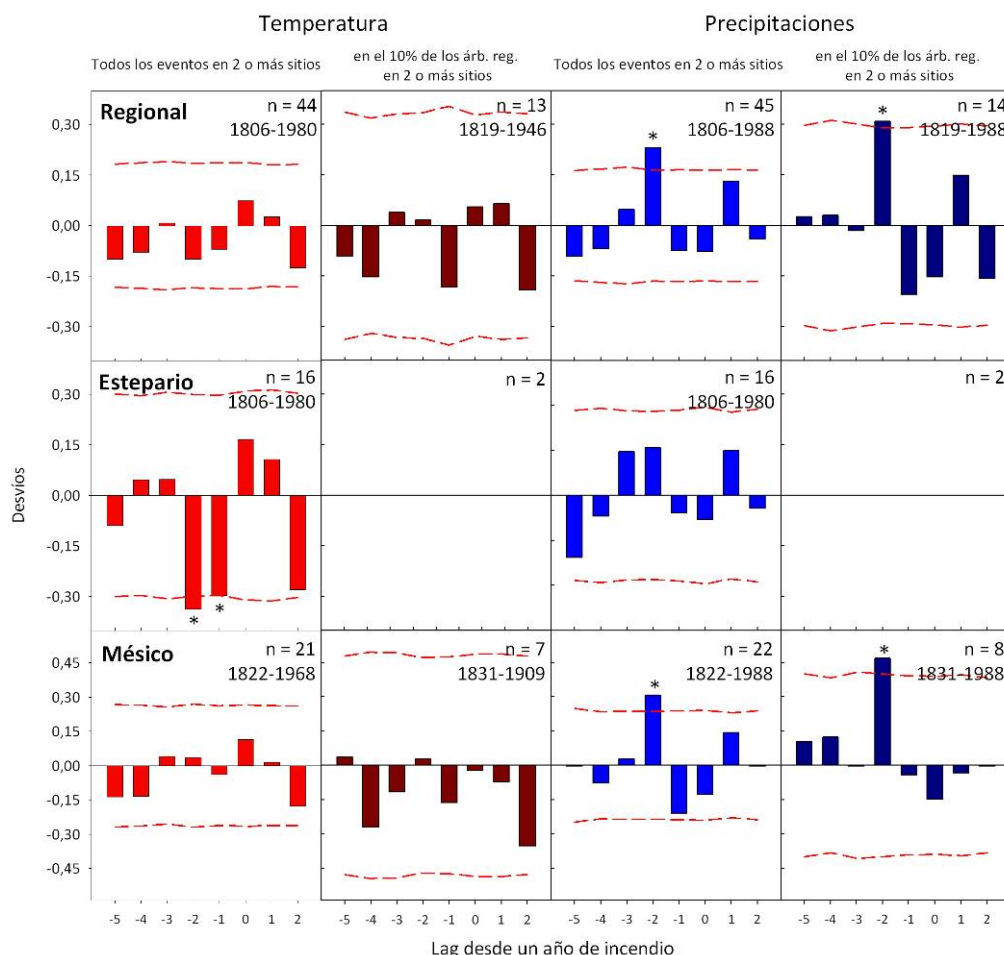


Fig 3.12 Desvíos promedios de las reconstrucciones regionales de temperatura de verano (Villalba 1990) y de precipitaciones de noviembre-diciembre (Villalba et al. 1998) en todos los cinco años anteriores y dos posteriores a los años de incendios (año 0) y en aquellos de gran magnitud a nivel Regional y por sector Estepario y México dentro del área de estudio. Las barras con asteriscos indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de valores medios determinados en 1000 simulaciones de Monte Carlo basados en el mismo número de años que de eventos (Mooney y Duval 1993). El intervalo de tiempo considerado comenzó cinco años antes que el primer evento dentro de los registros de las reconstrucciones de temperatura (869-1983) y precipitaciones (1597-1988). El número de incendios y período de tiempo considerados en cada análisis se indican en la esquina superior derecha de cada gráfico.

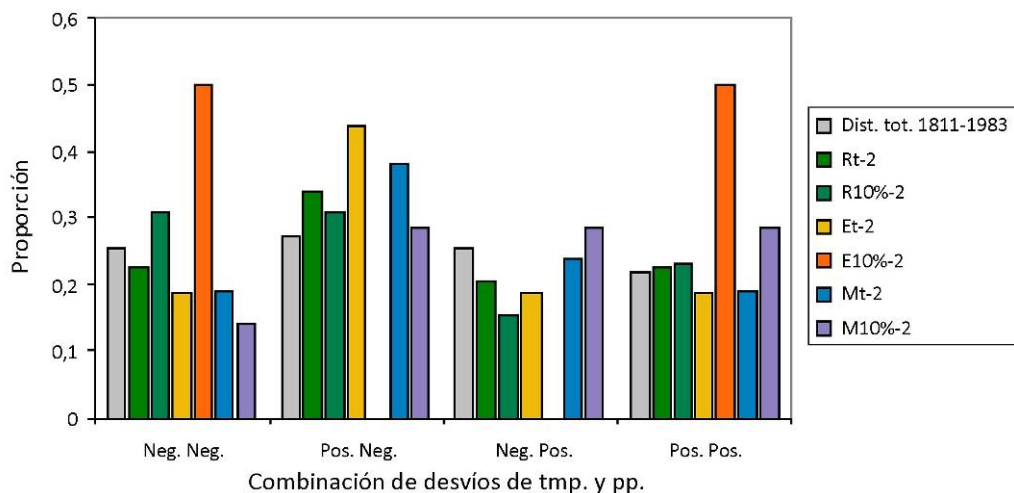


Fig 3.13 Proporción del número total de fuegos en cada uno de las categorías de agrupamiento (Regional, Estepario y Mésico) en comparación a la proporción total de años durante el período 1811-1983 (barras grises) en cada una de las combinaciones de desvíos de temperatura y precipitaciones en la región (Reconstrucciones: tmp de verano de Villalba (1990) y de pp. nov.-dic. de Villalba et al. (1998)). Códigos: Neg.: desvío negativo; Pos.: desvío positivo; Rt-2: Todos los eventos en dos o más sitios a nivel regional; R10%-2: Eventos en al menos 10% de los árboles registradores en dos o más sitios a nivel regional; Et-2: Todos los eventos en dos o más sitios a nivel de cronologías esteparias; E10%-2: Eventos en al menos 10% de los árboles registradores en dos o más sitios a nivel cronologías esteparias; Mt-2: Todos los eventos en dos o más sitios a nivel de cronologías mésicas; M10%-2: Eventos en al menos 10% de los árboles registradores en dos más sitios a nivel de cronologías mésicas

Al considerar únicamente los fuegos por causas climáticas, se observó que esos años fueron significativamente diferentes por los altos y bajos valores encontrados respectivamente en las reconstrucciones de temperatura y precipitaciones a nivel regional (Fig. 3.14). Resulta importante destacar las altas y significativas precipitaciones ocurridas al año siguiente de estos incendios.

Al comparar el patrón de diferentes indicadores de la actividad ENSO, como ser el índice de la Oscilación Sur (SOI por su acrónimo en inglés) reconstruido a partir de anillos de crecimiento y sus valores observados, y las temperaturas del mar (SST por su acrónimo en inglés) en las zonas Niño 3 y Niño 3.4, con los registros completos de incendios y los fuegos por causas climáticas, no se pudo encontrar una señal clara entre esta oscilación climática y los fuegos datados en este estudio (Fig. 3.15). Sin embargo, se observaron bajos valores del SOI en el registro de Allan et al. (1996) en los años de incendios por causas climáticas. Además y en

concordancia entre sí, se hallaron altos y significativos valores del SOI a los dos años de incendios climáticos a nivel regional y significativamente bajos desvíos en la temperatura del mar de la zona Niño 3 para este tipo de eventos ocurridos en los bosques esteparios.

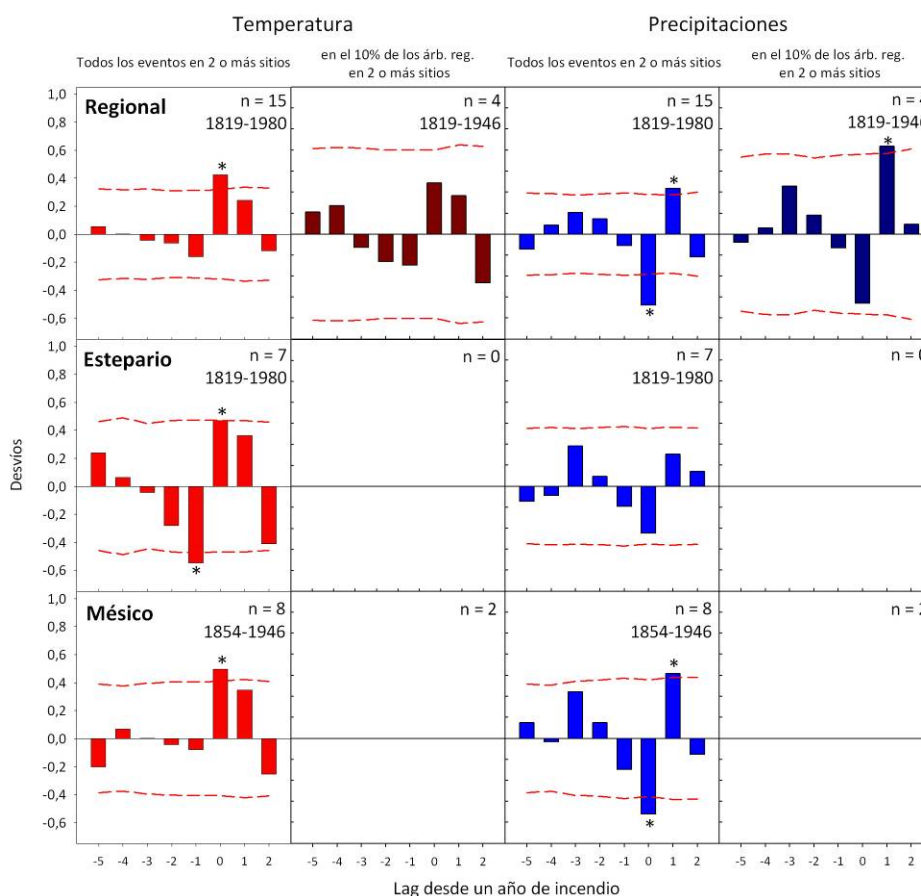


Fig 3.14 Desvíos promedios de las reconstrucciones regionales de temperatura de verano (Villalba 1990) y de precipitaciones de noviembre-diciembre (Villalba et al. 1998) para los cinco años anteriores y dos posteriores en todos los años de incendios (año 0) en dos o más sitios y en aquellos filtrados por altas temperaturas y bajas precipitaciones a nivel Regional y por sector Estepario y Mésico dentro del área de estudio. Las barras con asteriscos indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de valores medios determinados en 1000 simulaciones de Monte Carlo basados en el mismo número de años que de eventos (Mooney y Duval 1993). El intervalo de tiempo considerado comenzó cinco años antes que el primer evento dentro de los registros de las reconstrucciones de temperatura (869-1983) y precipitaciones (1597-1988). El número de incendios y período de tiempo considerados en cada análisis se indican en la esquina superior derecha de cada gráfico.

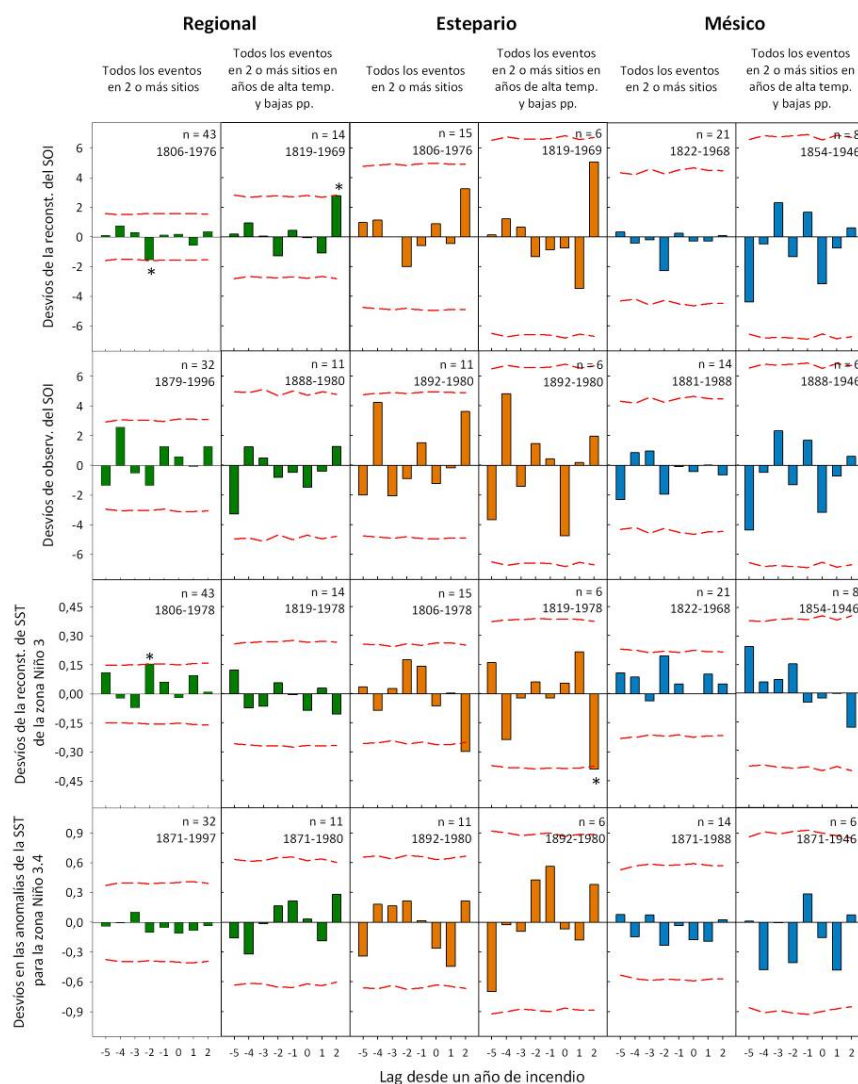


Fig 3.15 Desvíos promedios de: a) reconstrucción de SOI de invierno a partir de anillos de crecimiento 1706-1977 (Stahle et al. 1998), b) valores observados del SOI para los meses de diciembre a febrero entre 1876-1998 (Allan et al. 1996), c) reconstrucción de la temperatura del mar (SST) de Cook para los meses de diciembre a febrero en la zona Niño 3 a partir de anillos de crecimiento entre 1408 y 1978 (D'Arrigo et al. 2005) y d) reconstrucción de la temperatura del mar para la zona Niño 3.4 entre 1871 y 2000 (Trenberth y Stepaniak 2001) para los cinco años anteriores y dos posteriores en todos los años de incendios (año 0) y en aquellos filtrados por altas temperaturas y bajas precipitaciones a nivel Regional y por sector Estepario y Mésico dentro del área de estudio. Las barras con asteriscos indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de valores medios determinados en 1000 simulaciones de Monte Carlo basados en el mismo número de años que de eventos (Mooney y Duval 1993). El intervalo de tiempo considerado comenzó cinco años antes que el primer evento dentro de los registros de las reconstrucciones de temperatura (869-1983) y precipitaciones (1597-1988). El número de incendios y período de tiempo considerados en cada análisis se indican en la esquina superior derecha de cada gráfico.

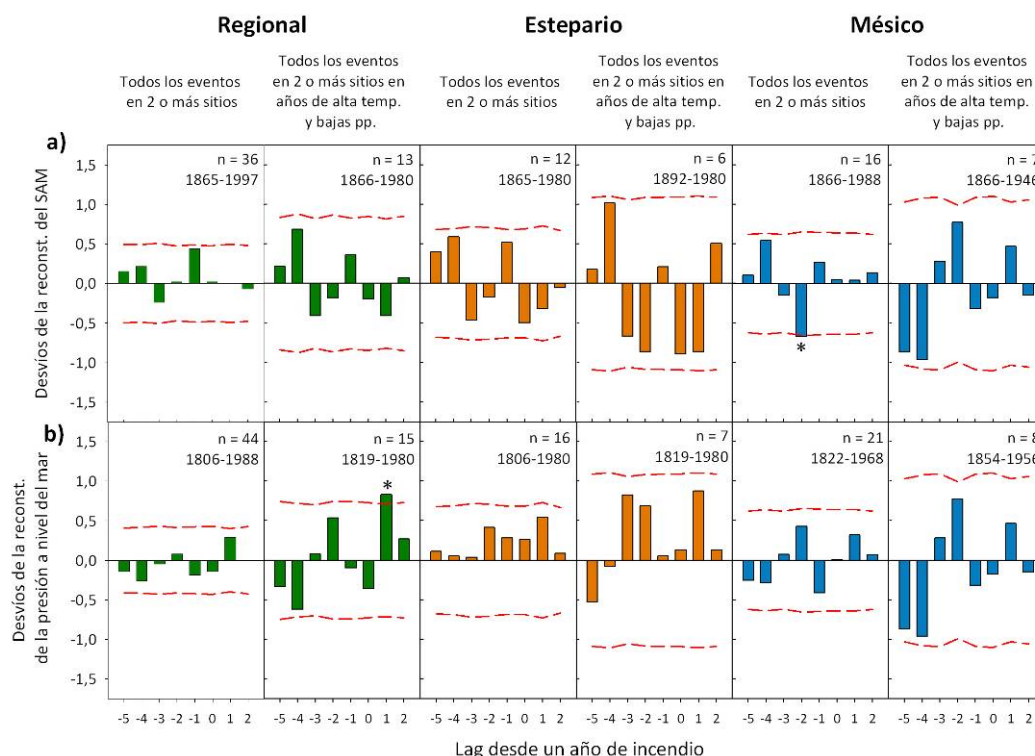


Fig 3.16 Desvíos promedios de las reconstrucciones de: a) de SAM de Fogt (Jones et al. 2009) y b) de la presión a nivel del mar entre los 50°-60° S en los alrededores de la Antártida (Villalba et al. 1997) para los cinco años anteriores y dos posteriores en todos los años de incendios (año 0) y en aquellos filtrados por altas temperaturas y bajas precipitaciones a nivel Regional y por sector Estepario y México dentro del área de estudio. Las barras con asteriscos indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de valores medios determinados en 1000 simulaciones de Monte Carlo basados en el mismo número de años que de eventos (Mooney y Duval 1993). El intervalo de tiempo considerado comenzó cinco años antes que el primer evento dentro de los registros de las reconstrucciones de SAM (1869-2005) y de presión a nivel del mar (1746-1984). El número de incendios y período de tiempo considerados en cada análisis se indican en la esquina superior derecha de cada gráfico.

En el caso de la oscilación Antártica (AAO por su acrónimo en inglés) o modo anular sur (SAM por su acrónimo en inglés), tampoco pudo encontrarse una relación significativa en el registro completo de incendios ni en aquellos fuegos por causas climáticas (Fig. 3.16). Merece la pena destacar el alto y significativo valor de presión a nivel del mar entre los 50°-60° de latitud sur registrado al año siguiente de los incendios climáticos a nivel regional.

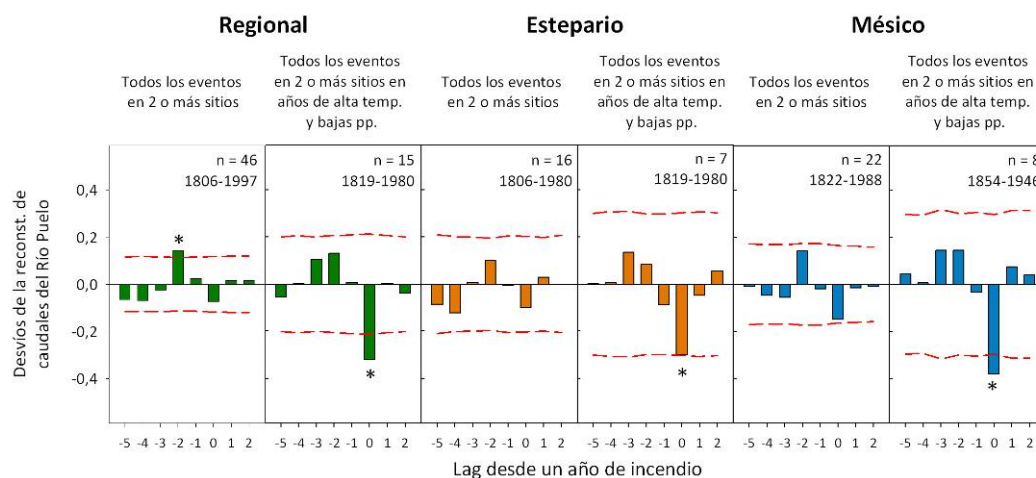


Fig 3.17 Desvíos promedios de la reconstrucción de caudal del río Puelo (Lara et al. 2008) para los cinco años anteriores y dos posteriores en todos los años de incendios (año 0) y en aquellos filtrados por altas temperaturas y bajas precipitaciones a nivel Regional y por sector Estepario y Mésico dentro del área de estudio. Las barras con asteriscos indican diferencias significativas ($p < 0,05$) de valores medios determinados en 1000 simulaciones de Monte Carlo basados en el mismo número de años que de eventos (Mooney y Duval 1993). El intervalo de tiempo considerado comenzó cinco años antes que el primer evento dentro de los registros de las reconstrucciones de caudales del río Puelo (1599-1999). El número de incendios y período de tiempo considerados en cada análisis se indican en la esquina superior derecha de cada gráfico.

Por último, el análisis de las fechas de incendios en el registro de caudales del río Puelo (1599-1999) reconstruido por Lara et al. (2008), cuya cuenca abarca los 41 y 42°20'S en Chile y Argentina, mostró desvíos negativos y significativos en años de fuegos por causas climáticas tanto a nivel Regional como por subgrupos Estepario y Mésico (Fig. 3.17). También se observó una leve tendencia negativa de los desvíos de caudales cuando se consideraron los registros completos de incendios (sin filtro por causas climáticas), aunque estos valores no se diferenciaron significativamente en ninguna de las tres situaciones analizadas.

3.4 DISCUSIÓN

En función de los resultados aquí presentados, se puede afirmar que los incendios constituyen disturbios de gran importancia en estos bosques dominados por *A. araucana* en función de la recurrencia de estos eventos reconstruida para los últimos 460 años.

En virtud de las alturas de las cicatrices en los fustes, se pudo inferir cierta tendencia de ocurrencia de fuegos de menor magnitud en los bosques méxicos en comparación a los esteparios en donde tuvieron mayores alturas sobre los troncos. En consecuencia, los incendios en bosques méxicos tenderían a ser de superficie y de menor magnitud. Sin embargo, existió variabilidad en los datos por sitio para poder arribar a una conclusión clara.

La mayor frecuencia de cicatrices pendiente arriba estaría posiblemente asociada a la combinación de esta variable topográfica sumada al efecto del viento y la consecuente dirección de los fuegos. Considerando la pendiente del terreno, es muy probable que la dirección de los fuegos en general haya sido hacia mayores posiciones altitudinales. De esta manera, las llamas se vuelcan hacia la superficie y en consecuencia calientan el combustible en el frente de avance favoreciendo la dispersión y velocidad del fuego (Whelan 1995). En consecuencia, el fuego fuerza la dirección del aire, generando su propio viento ascendente en la pendiente. Tal como describen Gutsell y Johnson (1996), los vórtices de las llamas aumentan cuando alcanzan un fuste y de esta manera se incrementa el tiempo de residencia y temperatura en el lado opuesto a la dirección del viento. El tiempo de residencia de las llamas se incrementa dos veces por diámetro de los árboles (m), dividido por la velocidad de dispersión del fuego (m.s^{-1}) y en función del proceso antes mencionado, las cicatrices terminan adoptando la forma triangular característica (Baker 2009).

El análisis de estacionalidad evidenció la dificultad que presenta la especie para distinguir la posición de las cicatrices dentro del anillo. Esto se debió principalmente a las características anatómicas del leño y a las alteraciones en los elementos del xilema producto de los cambios a nivel del cambium por causa del fuego. En muchos casos se encontraron cicatrices con gran dificultad para su datación debido al oscurecimiento del leño y deformación de las traqueidas. Dentro del grupo de muestras en el que se pudo establecer su estación de ocurrencia, se comprobó que mayoritariamente los incendios en bosques de *A. araucana* se producen a fines de primavera y durante los primeros meses de verano. Este período coincide con los meses de mayor déficit hídrico, hecho que permitiría la ocurrencia de incendios debido al estado de deshidratación de materiales combustibles y mayor temperatura del aire. Además, también

existe coincidencia con la etapa del año de mayor ocurrencia de rayos y tormentas de naturaleza convectiva (Kitzberger y Veblen 2002).

Los IMF compuesto ya sea para el registro completo por sitio, para el período común y en sus valores puntuales, demostraron una gran variabilidad entre sitios. La mayor recurrencia de incendios en Minchén (IMF para el período común: 5 años) podría deberse a su ubicación en el fondo del valle del arroyo Calfiquitra próximo a su desembocadura en el lago Ruka-Choroy. Este sitio ha sido elegido por las veranadas de ganado de las comunidades Mapuches desde hace gran cantidad de años debido a su fácil acceso y calidad de las plantas herbáceas del sotobosque y pastizales lindantes. La presencia humana en la zona desde hace décadas podría ser la causa de la mayor recurrencia de fuegos en comparación a los otros sitios. Por el contrario, el sitio de Pinalada Redonda en el valle del arroyo Malalco se ubicó en un bosque muy denso de renovales camino a una barda basáltica. A pesar que existe una comunidad Mapuche en las proximidades del lago Quillén, es posible que el sitio de Pinalada Redonda no haya sido tan frecuentemente visitado por el hombre debido a su difícil acceso. De hecho, para realizar los muestreos en este sitio se debió acceder al mismo mediante el uso de caballos debido al anegamiento de la llanura de inundación del arroyo Malalco. Los intervalos de fuego menores en Pinalada Redonda para los grandes fuegos en comparación al registro de todos los eventos en ese sitio se debió a que los mismos ocurrieron en el comienzo del registro y se ubicaron muy próximos entre sí en términos temporales.

Los IMF compuesto para el registro completo de cada sitio y para el período común 1867-2006 tuvieron valores similares a los hallados por González et al. (2005) y Quezada (2008). Al considerar los eventos de mayor magnitud, estos tuvieron una menor recurrencia que lo observado por Quezada (2008) (IMF en SCH: 23 y en SCV: 28) aunque con valores similares a los hallados por González et al. (2005).

Resulta importante destacar el efecto que han tenido la creación del Parque Nacional Lanín, los cambios en las pautas culturales y la política de control y lucha contra incendios desde 1930 en adelante en la historia de incendios de los diferentes sitios analizados. En todas las áreas muestreadas, se observó un aumento en los intervalos medios de fuego a partir de esos

años. Seguramente el patrón de recurrencia de incendios observado en Paso Tromen luego de la creación del Parque Nacional Lanín (1937), diferente al resto de los sitios dentro de esta área protegida se debe a su situación geográfica. El Paso Tromen constituye un paso fronterizo de gran cantidad de tráfico comercial y turístico. Dada la gran presión humana en la zona desde hace años, no solamente por el paso a Chile sino también por las prácticas turísticas y deportivas debido a la proximidad del volcán Lanín, el lago Tromen y a la presencia de un área de acampe, se podría explicar la ocurrencia de fuegos de baja magnitud en la zona como consecuencia de igniciones accidentales.

A nivel regional, en concordancia con lo detectado a nivel de sitio, se observó una fuerte disminución en la ocurrencia de incendios desde comienzos del siglo XX. Este descenso en la cantidad de fuegos coincidiría con el desplazamiento y exterminio de las poblaciones originarias, las que anteriormente provocaban incendios principalmente con fines de caza. Además, se podría asociar con la culminación del establecimiento de colonos europeos durante el cual los fuegos fueron extensivamente empleados para aclarar bosques, especialmente en las áreas de bosques mésicos con el objetivo de generar pasturas para el ganado (Willis 1914). Desde la década de 1930 la falta de fuegos intencionales y la supresión de incendios han sido relativamente efectivas en el mantenimiento de una baja frecuencia de estos disturbios. La alta presión ganadera que comenzó en 1900 también podría haber contribuido a la reducción de los combustibles y, en consecuencia, en la disminución de los incendios. Este hecho fue observado por Kitzberger y Veblen (1997) en bosques de *A. chilensis*. Sin embargo, el patrón hallado en este estudio se diferenció de la tendencia opuesta encontrada por González et al. (2005) y Quezada (2008) de aumento en la frecuencia de incendios en bosques de *A. araucana* en Chile a partir de 1883.

En aquellos registros que cubrieron más de dos siglos, se encontró un aumento en la ocurrencia de incendios durante el siglo XIX, hecho que también fue observado por Kitzberger y Veblen (1997) y Veblen et al. (1999) en bosques de *A. chilensis* del norte de Patagonia. En el caso de este estudio, la diferencia en la frecuencia de estos eventos entre el siglo XIX y XX por grupos de cronologías Esteparias y Mésicas podría deberse principalmente a que los registros

del segundo grupo quedaron mayoritariamente concentrados dentro del PN Lanín a excepción del sitio de Remeco. Resulta importante destacar que la frecuencia de incendios en el siglo XIX pudo haber sido mayor y actualmente no puede reconstruirse debido a la eliminación de cicatrices de fuegos antiguos a causa de incendios severos más actuales (Kitzberger et al. 2000, González et al. 2005, Quezada 2008). Incendios como los de 1931, 1944 y 1986 podrían haber sido los causantes de esta pérdida de información. Este hecho también sería el causante de no haber podido tener cronologías más largas de incendios en algunos sitios a pesar de las bondades de la especie en relación a su gruesa corteza y gran longevidad.

La ocurrencia sincrónica de fuego en algunos años en áreas extensivas hizo suponer la influencia de la variación climática interanual en este tipo de eventos en bosques de *A. araucana* de Argentina. Este hecho fue observado por Veblen et al. (1999) en los análisis de historias de incendio en bosques de *A. chilensis*, *Fitzroya cupressoides* y *Nothofagus dombeyi* en el norte de Patagonia. Por ejemplo, en este estudio se dataron incendios en cuatro sitios (Caviahue, Remeco, Rahue y Tromen) en el año 1944. Este año correspondió a un momento de extraordinaria extensión de incendios en el norte de Patagonia donde se quemaron alrededor de 44.855 ha en los cuatro Parques Nacionales de esa región (Veblen et al. 2002). En Quillelhue, Parque Nacional Villarrica (Chile), se registraron dos incendios severos en el año 1942 y 1944, simultáneamente con la floración y muerte masiva a nivel regional de *Chusquea culeou* (González et al. 2005). Incluso, Tortorelli (1947) describió la rápida dispersión de fuegos en 3.500 ha de bosques de *A. araucana* en enero de 1943 al norte del Parque Nacional Lanín favorecidos por la presencia *C. culeou* seca. El intervalo comprendido entre 1940 y 1945 es recordado históricamente por las grandes sequías que ocurrieron en la región lo que favoreció el desarrollo de grandes incendios (Veblen et al. 2002, González et al. 2005). Específicamente las primaveras y verano de 1942 y 1943 fueron extremadamente secas en todo el norte de Patagonia. El período comprendido entre noviembre de 1943 y febrero de 1944 fue el segundo más seco de todo el siglo XX y no hubo ninguna otra instancia bianual desde 1905 en donde las primaveras-veranos registraron un nivel de sequía similar al de 1942-1944 (Veblen et al. 2002).

A nivel de sitio, la falta de una relación clara entre las fechas de incendios en comparación con el crecimiento de *A. araucana* a nivel regional, a excepción de Ñorquínco, estaría indicando que la ocurrencia de estos disturbios respondería a factores locales. Sin embargo, a escala regional en función de lo hallado en el Capítulo 2 para la asociación de factores climáticos y el crecimiento de *A. araucana*, utilizando a la cronología standard regional como variable “proxy” climática, se puede inferir que la ocurrencia de incendios a este nivel de análisis es coincidente con la producción de anillos angostos (bajo incremento anual) y estaría asociado a la presencia de altas temperaturas durante el verano anterior a la estación de crecimiento y/o en ese mismo período, como así también a bajas precipitaciones en el trimestre septiembre-octubre-noviembre. La leve tendencia a un mayor crecimiento dos años antes de la ocurrencia de incendios, permitiría hipotetizar que un aumento en la productividad primaria neta originada por condiciones climáticas favorables en esa instancia habrían favorecido un incremento en la acumulación de biomasa combustible, favoreciendo las condiciones para la ocurrencia de incendios *a posteriori*. Sin embargo, al considerar los eventos de gran magnitud (determinados en dos cicatrices del 10% de los árboles capaces de registrarlos) no se observó esta tendencia de mayor crecimiento dos años previos a un evento de incendio.

La ausencia de relación entre las fechas de incendio en el sector Estepario con el crecimiento regional de la especie, podría deberse a que la ocurrencia de este tipo de disturbio en esa área podría presentar un régimen similar a lo que ocurre en la estepa. Allí, los incendios no son determinados principalmente por cuestiones climáticas sino por la dinámica natural de la vegetación. En contraposición, los incendios en bosques húmedos (sector Mésico) se asociaron con bajo crecimiento de la especie y en consecuencia con altas temperaturas y bajas precipitaciones. La ocurrencia de eventos capaces de dejar cicatrices en *A. araucana* en este tipo de fisonomías estaría fuertemente gobernada por el clima.

A pesar de lo hipotetizado anteriormente a través del crecimiento de la especie en los años de incendios, el análisis de épocas superpuestas con reconstrucciones regionales de temperaturas y precipitaciones no mostró el patrón esperado. Cabe recordar que tanto Veblen et al. (1999) como González y Veblen (2006) para bosques de *F. cupressoides* y *A. chilensis* en Argentina en

el primer estudio y de *A. araucana* en Chile en el segundo caso, hallaron relaciones positivas con la temperatura y negativa con la precipitaciones durante los años de incendios. La falta de diferenciación entre las frecuencias observadas para los años de incendios en sus combinaciones de signo en los valores de temperatura y precipitación en relación con lo esperado en el total de los años, permitiría afirmar que en los bosques estudiados este patrón climático no es el mayor predominante a la hora de determinar la ocurrencia de incendios. A pesar de ello, la relación significativa con las precipitaciones dos años antes de la ocurrencia de incendios a nivel regional y solamente en el subgrupo México, indicaría la necesidad de contar con acumulación de biomasa, producto de condiciones favorables, como altas precipitaciones para que se desencadenen estos disturbios. Por el contrario, la relación positiva durante los dos años previos a la ocurrencia de incendios en los sitios esteparios, no resulta en un patrón claramente interpretable en relación con este tipo de eventos.

Definitivamente la falta de relación esperada con la temperatura y las precipitaciones en el registro total de incendios, permitiría afirmar que otras variables, como por ejemplo la ocurrencia de rayos, y la presencia humana poseen un rol importante en la ocurrencia de incendios, especialmente esta última. Estos factores podrían explicar la ocurrencia de incendios en fechas en las que por temperatura y precipitaciones no sería esperable la presencia de estos eventos. En función de lo anteriormente planteado respecto a la sincronía de los cambios en la frecuencia con las modificaciones en las pautas culturales del hombre, la falta de una relación clara entre los eventos de incendio y el clima también podría estar debiéndose a que las fechas obtenidas en este estudio corresponden a un período con gran presión antrópica, especialmente durante todo el siglo XIX.

A pesar de la falta de relación entre todos los incendios con la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña, los valores de precipitación por encima de la media al año siguiente de los incendios a nivel regional y en el subgrupo México para aquellos fuegos por causas climáticas serían concordantes con lo hallado por Veblen et al. (1999) y González y Veblen (2006). A este hecho se suman los altos valores del Índice de Oscilación Sur (SOI) dos años después de los fuegos a nivel Regional y bajas temperaturas del mar en la zona Niño 3 registrado a nivel

Estepario. Por lo tanto, existiría una leve tendencia de correspondencia entre la ocurrencia de fuegos en las últimas etapas de eventos El Niño, cuando los veranos son cálidos y secos y/o cuando el sistema ENSO está en transición a la fase La Niña, tal como fuera observado por Veblen et al. (1999) y González y Veblen (2006). Sin embargo, esos altos valores de precipitación al año siguiente de los incendios también estarían debiéndose a la alta presión a nivel del mar en altas latitudes. De esta manera, un centro de alta presión en la zona antártica favorecería el ingreso de los “westerlies” al norte de Patagonia, encargados de las precipitaciones en la zona.

La relación significativa entre los incendios climáticos y los caudales reconstruidos del río Puelo, demuestran una estrecha relación entre las precipitaciones en el norte de Patagonia y la ocurrencia de estos eventos. Además, en función de lo hallado por Lara et al. (2008) para el régimen de este río y su vinculación negativa con la AAO, se puede inferir que los fuegos en estos bosques también tendrían una relación con esta oscilación antártica, aunque de signo positivo a pesar de no haberse hallado, en este estudio, relaciones directas entre los incendios y este forzante.

A modo de conclusión se puede afirmar que los incendios reconstruidos en bosques de *A. araucana* en este estudio mostraron variabilidad temporal asociada principalmente a los cambios en las pautas culturales ocurridas durante los últimos siglos. Por otra parte, la sincronía regional se estaría debiendo a un efecto climático regional, aunque de menor magnitud. Sin embargo, la influencia antrópica aparecería más fuerte que la señal climática y de alguna manera habría condicionado la falta de significancia entre el registro de estos eventos y las reconstrucciones de temperatura, precipitación, actividad ENSO y AAO.

3.5 BIBLIOGRAFÍA

- Agee, J. 1993. Fire ecology of Pacific Northwest forests. Island Press, Washington, D.C.
- Allan, R., J. Lindesay, y D. Parker. 1996. El Niño/Southern Oscillation & Climatic Variability. CSIRO Publishing, Victoria.
- Arno, S. F., y K. M. Sneek. 1977. A method for determining fire history in coniferous forests of the Mountain West. Página 28. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, Utah.
- Baisan, C., y T. Swetnam. 1990. Fire history on a desert mountain range: Rincon Mountain

- Wilderness. Canadian Journal of Forest Research 20:1559–1569.
- Baker, W. 1989. Effect of scale and spatial heterogeneity on fire-interval distributions. Canadian Journal of Forest Research 19:700-706.
- Baker, W. 2009. Fire Ecology in Rocky Mountain Landscapes. Island Press, Washington, D.C.
- D'Arrigo, R. D., E. Cook, R. Wilson, R. Allan, y M. Mann. 2005. On the variability of ENSO over the past six centuries. Geophysical Research Letters 32:L03711. doi: 10.1029/2004GL022055.
- Dieterich, J. 1980. The Composite Fire Interval - A tool for more accurate interpretation of fire history. Páginas 8-14 *en* M. Stokes y J. Dieterich, editores. Proceedings of the Fire History Workshop. USDA Forest Service, Tucson, Arizona.
- Dieterich, J., y T. Swetnam. 1984. Dendrochronology of a fire scarred ponderosa pine. Forest Science 30:238-247.
- González, M., y T. Veblen. 2006. Climatic influences on fire in Araucaria araucana-Nothofagus forests in the Andean cordillera of south-central Chile. Écoscience 13:342-350.
- González, M. E., T. Veblen, y J. S. Sibold. 2005. Fire history of Araucaria-Nothofagus forests in Villarrica National Park, Chile. Journal of Biogeography 32:1187-1202.
- Grissino-Mayer, H. 1995. Tree-ring reconstructions of climate and fire at El Malpais National Monument, New Mexico. PhD Thesis, University of Arizona, Tucson, Arizona.
- Grissino-Mayer, H. 2001. FHX2-Software for analysing temporal and spatial patterns in fire regimes from tree rings. Tree-Ring Research 57:115-124.
- Gutsell, S., y E. Johnson. 1996. How fire scars are formed: coupling a disturbance process to its ecological effect. Canadian Journal of Forest Research 26:166-74.
- Holmes, R. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin 43:69-75.
- Jones, J. M., R. L. Fogt, M. Widmann, G. J. Marshall, P. D. Jones, y M. Visbeck. 2009. Historical SAM Variability. Part I: Century-Length Seasonal Reconstructions*. Journal of Climate 22:5319-5345.
- Kitzberger, T. 1994. Fire regime variation along a northern Patagonian forest-steppe gradient: stand and landscape response. University of Colorado, Department of Geography, Boulder.
- Kitzberger, T., y T. Veblen. 1997. Influences of humans and ENSO on fire history of Austrocedrus chilensis woodlands in northern Patagonia, Argentina. Écoscience 4:508-520.
- Kitzberger, T., y T. Veblen. 2002. Influences of climate on fire in northern Patagonia, Argentina. Páginas 296-321 *en* T. Veblen, W. Baker, G. Montenegro, y T. W. Swetnam, editores. Fire and Climatic Changes in Temperate Ecosystems of the Western Americas. Springer-Verlag, New York.
- Kitzberger, T., T. Veblen, y R. Villalba. 1997. Climatic influences on fire regimes along a rain forest-to-xeric woodland gradient in northern Patagonia, Argentina. Journal of Biogeography 24:35-47.
- Kitzberger, T., T. Veblen, y R. Villalba. 2000. Métodos dendroecológicos y sus aplicaciones en

- estudios de dinámica de bosques templados de Sudamérica. Páginas 17-78 en F. Roig, editor. *Dendrocronología en América Latina*. EDIUNC, Mendoza.
- Lara, A., R. Villalba, y R. Urrutia. 2008a. A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer–fall streamflow in the Valdivian Rainforest eco-region, Chile. *Climate Change* 86:331-356.
- Lara, A., R. Villalba, y R. Urrutia. 2008b. A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer–fall streamflow in the Valdivian Rainforest eco-region, Chile. *Climatic Change* 86:331-356. doi: 10.1007/s10584-007-9287-7.
- McBride, J. 1983. Analysis of tree rings and fire scars to establish fire history. *Tree-Ring Bulletin* 43:51-67.
- Mooney, C., y R. Duval. 1993. *Bootstrapping: a nonparametric approach to statistical inference*. Sage, Newbury Park, California.
- Quezada, J. 2008. Historia de incendios en bosques de *Araucaria araucana* (Mol.) Koch del Parque Nacional Villarrica, a partir de anillos de crecimiento y registros orales. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia.
- Romme, W. 1980. Fire history terminology: report of the Ad Hoc Committee. Páginas 135-127 en M. Stokes y J. Dieterich, editores. *Proceedings of the Fire History Workshop*. USDA Forest Service, Tucson, Arizona.
- Schulman, E. 1956. *Dendroclimatic changes in semiarid America*. University of Arizona Press, Tucson.
- Stahle, D. W., M. K. Cleaveland, M. D. Therrell, D. A. Gay, R. D. D'Arrigo, P. J. Krusic, E. R. Cook, R. J. Allan, J. E. Cole, R. B. Dunbar, M. D. Moore, M. A. Stokes, B. T. Burns, J. Villanueva-Diaz, y L. G. Thompson. 1998. Experimental Dendroclimatic Reconstruction of the Southern Oscillation. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79:2137-2152.
- Stokes, M., y T. Smiley. 1968. *An introduction to tree-ring dating*. University of Chicago Press, Chicago.
- Swetnam, T. 1993. Fire history and climate change in giant sequoia groves. *Science* 262:885-889.
- Tortorelli, L. 1947. *Los incendios de bosques en la Argentina*. Ministerio de Agricultura, Buenos Aires.
- Trenberth, K. E., y D. P. Stepaniak. 2001. Indices of El Niño Evolution. *Journal of Climate* 14:1697-1701.
- Veblen, T., T. Kitzberger, E. Raffaele, y D. Lorenz. 2002. Fire History and Vegetation Changes in Northern Patagonia, Argentina. Página 444 en T. Veblen, W. Baker, G. Montenegro, y T. Swetnam, editores. *Fire and Climatic Changes in Temperate Ecosystems of the Western Americas*. Springer-Verlag, New York.
- Veblen, T., T. Kitzberger, R. Villalba, y J. Donnegan. 1999. Fire history in Northern Patagonia: the roles of humans and climatic variation. *Ecological Monographs* 69:47-67.
- Villalba, R. 1990. Climatic Fluctuations in Northern Patagonia during the Last 1000 Years as Inferred from Tree-Ring Records. *Quaternary Research* 34:346-360.

- Villalba, R., E. R. Cook, R. D. D'Arrigo, G. C. Jacoby, P. D. Jones, M. J. Salinger, y J. Palmer. 1997. Sea-level pressure variability around Antarctica since A.D. 1750 inferred from subantarctic tree-ring records. *Climate Dynamics* 13:375-390. doi: 10.1007/s003820050172.
- Villalba, R., E. Cook, G. Jacoby, R. D'Arrigo, T. Veblen, y P. Jones. 1998. Tree-ring based reconstruction of northern Patagonia precipitation since AD 1600. *The Holocene* 8:659-674.
- Whelan, R. 1995. *The ecology of fire*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Willis, B. 1914. *El Norte de la Patagonia*. Dirección de Parques Nacionales, Buenos Aires.
- Yamaguchi, D. 1991. A simple method for cross-dating increment cores from living trees. *Canadian Journal of Forest Research* 21:414-446.

Estructura de rodales de *Araucaria araucana* afectados por incendios: clases diamétricas, establecimiento y patrones de crecimiento

CAPÍTULO 4

4.1 INTRODUCCIÓN

La estructura de la vegetación es la organización en el espacio de los individuos que forman un rodal (Dansereau 1957, Donoso-Zegers 1993). Existen diferentes interpretaciones en cuanto a los componentes de esta estructura; sin embargo, desde el punto de vista forestal, Kershaw (1973) distingue tres componentes: 1) estructura vertical, que indica el ordenamiento de la vegetación en capas, estratos o doseles; 2) estructura horizontal, que se refiere a la distribución espacial de los individuos y de las especies en la superficie del rodal y 3) estructura cuantitativa, que se puede expresar de distintas maneras, por ejemplo densidad, frecuencia, cobertura, y especialmente en el área forestal, los parámetros más comunes son la altura total de los árboles, el área basal y la biomasa por compartimento. En una forma más sintética, Mueller-Dombois y Ellenberg (1974) definieron la estructura de un rodal como la distribución numérica de los individuos de diferente tamaño de cada una de las especies arbóreas que conforma ese nivel de organización.

La distribución de edades dentro de los rodales varía desde una situación en la que de todos los individuos pertenecen a una sola cohorte, a otra completamente distinta en la que los árboles se distribuyen uniformemente más de una cohorte, o incluso todos los individuos se ubican en forma desigual en ellas. La frecuencia y magnitud de los disturbios determinan las distribuciones etáreas de los rodales (Oliver y Larson 1996). Se considera una cohorte a un grupo de individuos que se establece tras un disturbio. El rango etéreo dentro de una cohorte puede ser tan sólo un año o tan amplio como varias décadas, dependiendo del tiempo durante el cual los árboles se han instalado en el área tras un disturbio. Rodales que son productos de un sólo disturbio se los considera de una cohorte simple, mientras que aquellos que presentan componentes arbóreos consecuencia de dos o más disturbios se los denomina de cohortes

múltiples o multi-cohortes (del inglés “single-cohort stands” y “multiple-cohort stands” *sensu* Oliver y Larson 1996). De esta manera, el reconocimiento de múltiples cohortes dentro de la estructura etárea de un rodal nos permite inferir la ocurrencia de más de un disturbio que las ha originado.

La dendroecología utiliza las variaciones históricas en el incremento radial anual de los anillos de crecimiento de los árboles para analizar la influencia que tienen las variaciones ambientales en el crecimiento de los árboles, la estructura de los rodales y la dinámica de los mismos (Fritts y Swetnam 1989). Recientemente, las técnicas dendroecológicas han cobrado gran importancia para la identificación y documentación de los regímenes históricos de disturbios en los rodales forestales (Rubino y McCarthy 2004). De acuerdo al principio dendrocronológico del crecimiento agregado (del inglés “Principle of Aggregate Tree Growth”), las características del anillo (incremento y anatomía) de un año particular representan el producto acumulado de factores bióticos y abióticos como la tendencia biológica de crecimiento asociada a la edad, el clima y una variada gama de disturbios (Fritts 1976, Cook 1987). Los disturbios tanto endógenos (dinámica a nivel de rodal) como exógenos (originados fuera del rodal) tienen gran influencia sobre la tasa de crecimiento radial (Cook 1987, Nowacki y Abrams 1997). De esta manera, la historia de los regímenes de disturbios es reconstruida utilizando métodos de identificación de liberaciones en el crecimiento radial en función de criterios predeterminados. Las liberaciones pueden ser el resultado de cambios en el ambiente del árbol, como aumentos en la disponibilidad de luz, hídrica o de nutrientes del suelo, luego de un disturbio que produce modificaciones en la relación de competencia en el entorno del individuo (White y Pickett 1985, Kienast y Schweingruber 1986). En el caso del fuego, como agente de disturbio, el análisis del patrón de crecimiento de los anillos de los árboles, complementario a la información histórica de incendios, puede aportar aún más información sobre su incidencia en la dinámica de rodales y en el régimen de este tipo de disturbio.

El fuego es uno de los factores responsables del patrón espacial distintivo y de las estructuras de las comunidades vegetales, particularmente en aquellas dominadas por arbustos y ciertas coníferas (por ejemplo Christensen 1985, White 1985). Burns (1991) estudió la

dinámica de la regeneración de *Araucaria araucana* en sus diferentes asociaciones a través del análisis de la estructura de los rodales. En los rodales abiertos de *A. araucana* en el límite este de su distribución en contacto con la estepa, las estructuras de baja densidad de individuos reflejan por un lado las extremas condiciones ambientales para la especie, la vinculación al sustrato rocoso pero también la alta frecuencia de disturbios, principalmente incendios. En los sitios moderadamente xéricos ocupados por el tipo forestal *A. araucana* - *Nothofagus antarctica* el fuego es un importante disturbio que condiciona la estructura de los rodales (Burns 1993). Debido a la gran capacidad de rebrote luego de un fuego, *N. antarctica* puede dominar los rodales post-fuego durante varias décadas (Veblen y Lorenz 1987). Sin embargo, las plántulas de *A. araucana* provenientes tanto de árboles sobrevivientes (rebrote) o de semillas instaladas tras el disturbio, se establecen debajo de la sombra parcial de la canopia de *N. antarctica*. Luego de 70 años, estos individuos eventualmente superan la canopia de *N. antarctica* y su crecimiento se acelera (Burns 1993). Luego de 150 años de ausencia de fuegos, *A. araucana* eventualmente suprime y excluye a los senescentes ejemplares de *N. antarctica* de manera que el rodal queda dominado por la primera especie (Burns 1993). En el caso de los bosques méxicos con codominancia de *A. araucana*, *N. pumilio* y *N. dombeyi*, ambos géneros se instalan concurrentemente luego del fuego o volteo por viento y alcanzan la canopia a partir de la dinámica de “gaps”, experimentando importantes períodos de liberaciones y supresiones en sus crecimientos radiales como producto de los cambios en la competencia (Burns 1991).

A pesar de estos pioneros e importantes estudios de Burns (1991, 1993), hasta el momento, no se han vinculado la historia de incendios reconstruida a través de cicatrices de fuego y los patrones de crecimiento regional con la dinámica de establecimiento y patrones de liberaciones en bosques de *A. araucana* para la comprensión de la estructura de estos bosques en términos de la dinámica de rodales. Por lo tanto, los objetivos de este capítulo son: 1) analizar las distribuciones de clases diamétricas y etáreas en los rodales en los que se reconstruyó la historia de incendios por medio de la datación de cicatrices de fuego (Capítulo 3 de esta tesis), 2) fechar las posibles liberaciones en los patrones de los individuos registrados en las parcelas de

estructura y 3) vincular las fechas de cambio de crecimiento con los incendios datados y el establecimiento de la especie.

4.2. MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1 Muestreos

En diciembre de 2008, se establecieron parcelas temporales en siete de los diez rodales de *A. araucana* en los cuales se estudió su historia de incendio (Fig. 4.1 y ver Capítulo 3). En cada sitio se instalaron dos parcelas circulares dentro del polígono definido por los árboles a los que se les extrajo secciones transversales parciales para la datación de los fuegos. Para ello, se ubicaron aleatoriamente los centros de las parcelas a través del uso de un sistema de información geográfica (SIG) (Fig. 4.2). Luego, mediante el uso de una unidad de GPS (acrónimo del término inglés Global Positioning System o sistema de posicionamiento global) se localizaron los puntos en el campo y se tomaron las coordenadas nuevamente, ya que en algunos casos se debió corregir la posición debido a la pérdida de señal de satélites. Solamente en Ruka Choroy una de las parcelas (RUC2) quedó fuera del polígono de cicatrices de fuego aunque se ubicó muy próxima a uno de los árboles a los que se le extrajo una sección transversal parcial. Las parcelas temporales de forma circular tuvieron radios de tamaño variable y quedaron definidas por un número fijo de 30 individuos (Tabla 4.1).

Dentro de estas parcelas, a modo de caracterizar la estructura forestal, se registraron las especies, se censaron los individuos adultos (diámetro a 1,3 m de altura (DAP) superior a 5 cm) y renovales o brinzales (altura total > 2 m y DAP < 5 cm). En todos los individuos censados, se registró su distancia y azimuth respecto al centro de la parcela, especie, condición (vivo o muerto) y DAP. Se midió la altura total de tres individuos por parcela de manera de estimar la altura media dominante (AMD). Además, se seleccionaron 15 individuos del total a los que se extrajo dos o más tarugos con barreno de incrementos o de Pressler con el objetivo de estimar sus edades. Se procuró que los individuos seleccionados cubrieran el rango completo de DAP registrados en cada parcela. El número de tarugos por individuo varió en función de alcanzar la médula o al menos observar arcos de anillos de crecimiento completos próximos a la misma.

Estas muestras se tomaron a 50 cm de altura por lo que todas las edades están referidas a esta posición en los individuos.

Las plántulas (individuos con alturas inferiores a 2 m) fueron contabilizadas en tres parcelas rectangulares de 10 m² de superficie (2 m de largo x 5 m de ancho). Una de ellas fue instalada en el punto central coincidente con el centro de las parcelas circulares y las otras dos se ubicaron a 10 m hacia el norte y 10 m hacia el sur. Los límites de las categorías de individuos fueron establecidos en función de los criterios utilizados en estudios previos de *A. araucana* en Chile (Veblen 1982).

4.2.2 Procesamiento de los tarugos

Al igual que en las muestras empleados para el desarrollo de las cronologías de anillos de referencia (Capítulo 2 de esta tesis), los tarugos fueron montados, pulidos y fechados visualmente siguiendo los criterios de Stokes y Smiley (1968).

Estas muestras de barreno fueron cofechadas visualmente bajo lupa binocular (50 x) mediante el método de la lista (Yamaguchi 1991) y se utilizaron como patrones de comparación a las cronologías de referencia desarrolladas en sitios muy próximos (ver Capítulo 2). Nuevamente, los anillos anuales fueron asignados al año de comienzo de la formación del leño siguiendo la convención de Schulman (1956) para el hemisferio sur. Los anchos de anillos fueron medidos mediante una tableta Velmex UniSlide conectada a un contador digital Metronics Quick-Chek QC-10V con una precisión de 0,001 mm. La calidad del fechado de las series (presencia de anillos falsos y/o anillos ausentes) se verificó mediante el empleo del programa COFECHA (Holmes 1983).

Tabla 4.1 Características de las parcelas

Sitio	Parcela	Latitud S	Longitud W	Elevación (msnm)	Pend. (°)	Exp.	Radio (m)	Sup. (m ²)
Paso del Arco (PAR)	PAR1	38°49'54,2"	71°03'30,6"	1431	4	E (72°)	15,8	784
	PAR2	38°50'02,4"	71°03'19,3"	1400	5	SE (116°)	10,7	360
Remeco (REM)	REM1	39°04'01,5"	71°19'51,7"	1123	16	W (276°)	10,6	353
	REM2	39°03'58,8"	71°19'48,6"	1169	25	W (292°)	13,5	573
Ruka Choroy (RUC)	RUC1	39°14'02,5"	71°10'28,0"	1307	19	W (284°)	31,0	3019
	RUC2	39°13'57,6"	71°10'25,2"	1305	11	W (282°)	20,9	1372
Minchén (MIN)	MIN1	39°15'16,8"	71°13'08,4"	1251	12	E (92°)	9,9	308
	MIN2	39°15'20,1"	71°13'18,8"	1433	0	-	8,4	222
Rahue (RAH)	RAH1	39°23'30,7"	70°47'59,3"	1483	9	E (112°)	24,1	1825
	RAH2	39°23'49,1"	70°47'22,0"	1435	17	S (160°)	50,0	7854
Ea. Nahuel Mapi (MAP)	MAP1	39°32'15,7"	71°02'28,7"	1476	3	E (112°)	15,0	707
	MAP2	39°32'34,8"	71°02'35,4"	1521	3	E (100°)	10,2	327
Paso Tromen (TRO)	TRO1	39°35'02,5"	71°27'32,4"	1199	0	-	10,1	320
	TRO2	39°35'06,8"	71°27'43,6"	1200	0	-	14,4	647

Sitio: nombre del sitio (código); msnm: metros sobre el nivel del mar; Pend.: pendiente; Exp.: exposición o aspecto en coordenadas geográficas (azimuth); Sup.: superficie

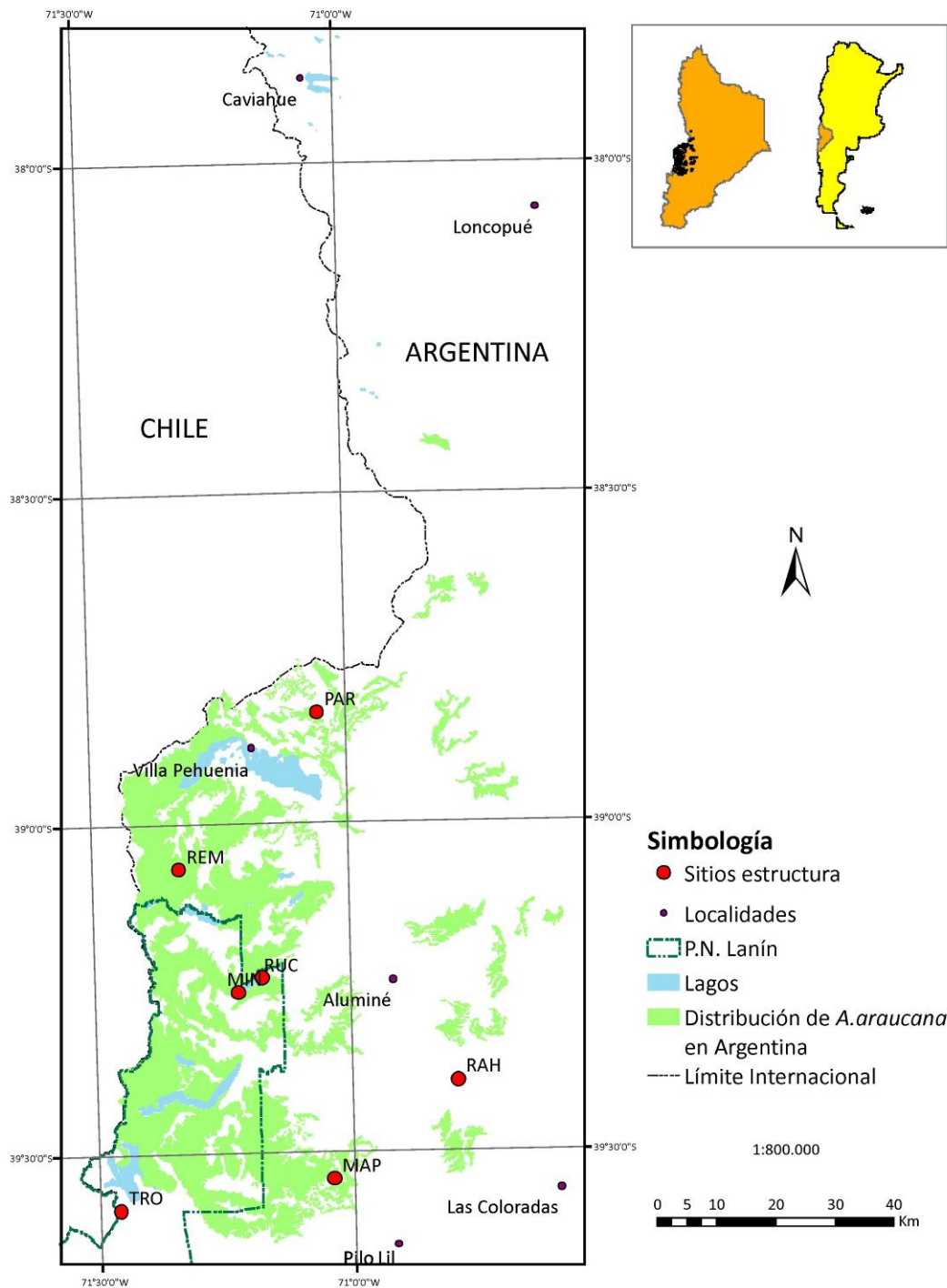


Figura 4.1 Distribución espacial de los sitios de parcelas de estructura en el área de distribución de *A. araucana* en Argentina (ver Tabla 4.1 por el detalle de los códigos.).

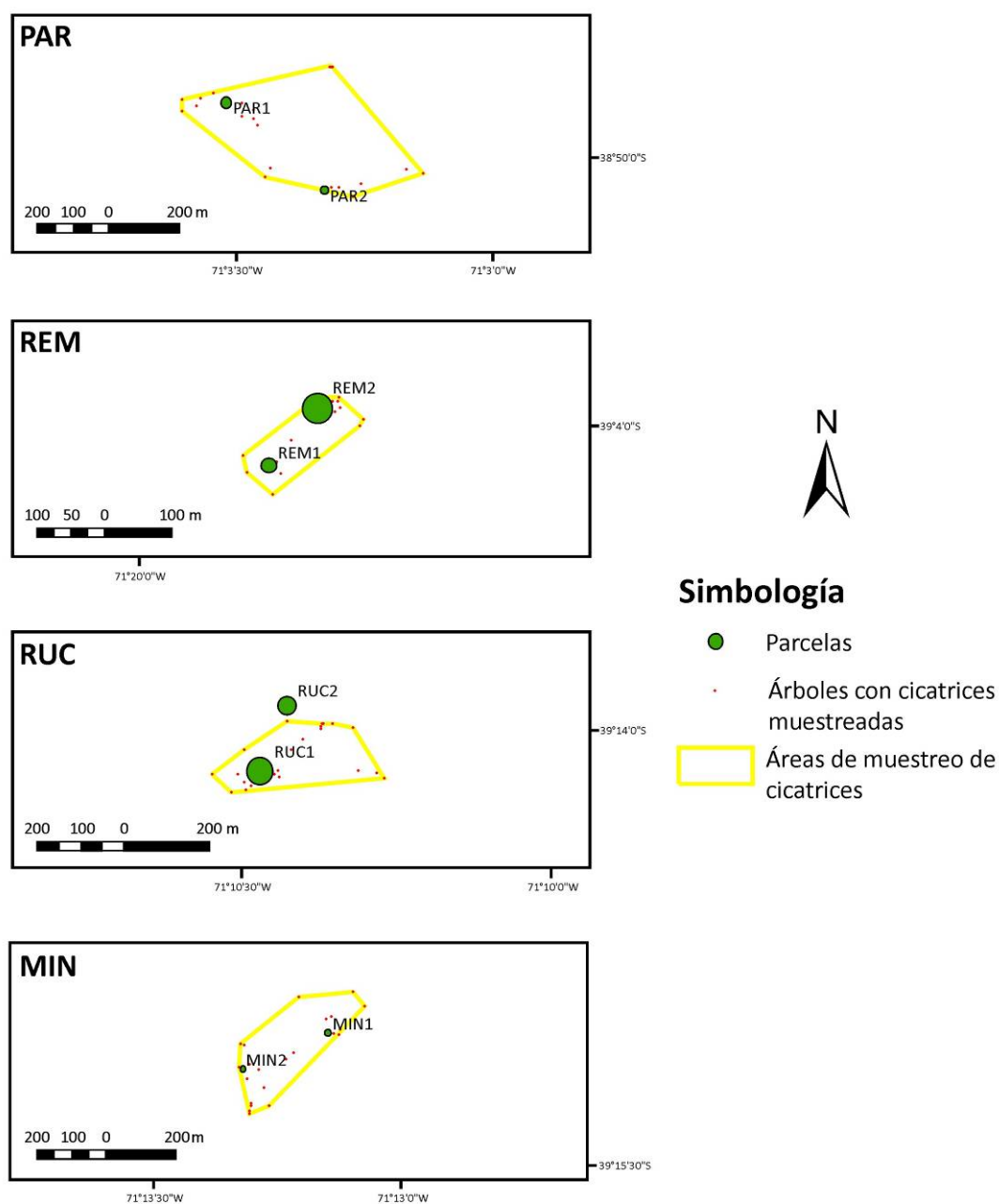


Figura 4.2 Ubicación espacial de las parcelas en relación a los árboles muestreados para la reconstrucción de la historia de incendios en cada sitio. En la esquina superior izquierda se presentan los códigos de cada sitio (ver tabla 4.1 para detalles). Los círculos verdes representan a las parcelas en la escala de cada mapa por sitio en función de su radio. Los puntos rojos representan los árboles analizados en el capítulo 3 aunque sus tamaños no se encuentran en escala.

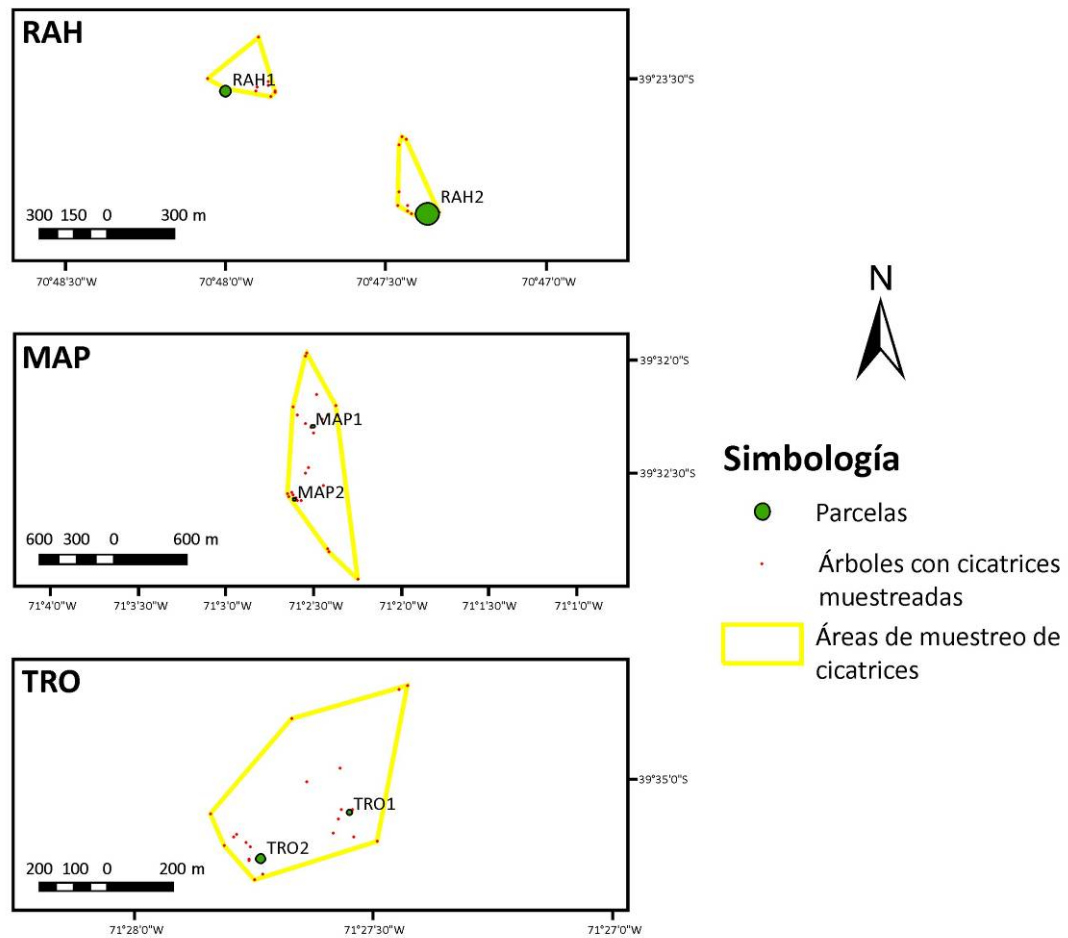


Figura 4.2 *Continuación*

En el caso de las muestras que no alcanzaron la médula, pero que tenían los arcos internos completos, se utilizó el método geométrico de Duncan (1989) para estimar la cantidad de anillos faltantes hasta el centro (Fig 4.3). Este método asume un crecimiento concéntrico, de manera que los límites de los anillos pueden ser considerados como arcos de circunferencias centrados en la médula (Rozas 2003). De esta manera, una estimación válida del largo del radio faltante se calcula mediante la siguiente ecuación (Rozas 2003):

$$d = \frac{L^2 + 4h^2}{8h}$$

donde d es la distancia estimada del arco visible mayor a la médula y h y L son respectivamente la altura y el largo de este arco (Fig 4.3). La cantidad de anillos faltantes hasta la médula se obtuvo al dividir d por el ancho promedio de los 10 anillos posteriores al último arco entero visible. En el caso de *A. araucana*, dado que la especie presenta una médula parenquimática de gran tamaño, antes se realizó un promedio de los radios de las mismas por sitio y este valor se sustrajo al valor de d .

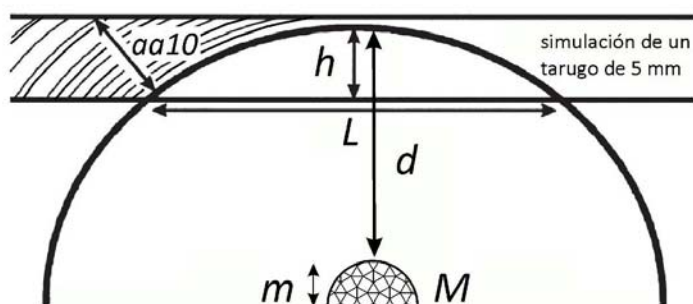


Figura 4.3 Esquema de una muestra de barreno que presenta la médula (M) y el mayor arco visible (modificado de Duncan (1989) y Rozas (2003)). Altura del arco (h), largo (L), la verdadera distancia a la médula (d), el radio de la médula (m) para muestras de *A. araucana*, y el ancho de anillos para los 10 años adyacentes al arco ($aa10$).

4.2.3 Análisis a nivel de parcela

Con la información recolectada en las parcelas y con la obtenida de los tarugos se calcularon las densidades (ind/ha) de plántulas, renovales y adultos, área basal de adultos (AB) total (m^2/ha), altura media dominante (AMD en m) y edad promedio a nivel parcela y luego el promedio por sitio. Además, se calcularon las frecuencias de individuos por clase diamétrica de 10 cm y por fechas de establecimiento en clases de 10 años por especie.

Las comparaciones de medias entre sitios para las variables densidad, AB y AMD se realizaron mediante Análisis de la Varianza de una vía (ANOVA) o prueba de Kruskal-Wallis en función de la normalidad de los datos. El ANOVA permite probar hipótesis referidas a los parámetros de posición (esperanza) de dos o más distribuciones. Para ello, descompone la variabilidad total en la muestra (suma de cuadrados total de las observaciones) en componentes (sumas de cuadrados) asociados cada uno a una fuente de variación reconocida (Searle 1971).

Los supuestos tradicionales del ANOVA implican errores independientes, normalmente distribuidos y con varianzas homogéneas para todas las observaciones. Por otra parte, la prueba de Kruskal-Wallis permite realizar un análisis de varianza no paramétrico a una vía de clasificación. El ANOVA propuesto por Kruskal y Wallis permite comparar las esperanzas de dos o más distribuciones sin necesidad de realizar el supuesto de que los términos de error se distribuyen normalmente (Balzarini et al. 2008). En todos los casos, la condición de normalidad fue evaluada previamente mediante test de Shapiro-Wilk. Las diferencias entre pares de medias en los ANOVAs fueron analizadas mediante una prueba *a posteriori* de LSD de Fisher.

Dado que no se extrajeron muestras de todos los individuos y teniendo en cuenta los descartes de muestras en función de pudriciones o por imposibilidad de lograr el cofechado de las mismas, los pares de edades y DAP fueron examinados en un análisis de componentes principales (PCA, según su acrónimo en inglés) con el objetivo de ordenar los sitios por sus patrones de variabilidad en el crecimiento. De esta manera, se ajustaron diferentes ecuaciones por grupos de sitios que permitieron la estimación de las edades (a 50 cm de altura) en aquellos individuos a los que no se les extrajo tarugos. Se consideró la ecuación que tuvo mayor coeficiente de determinación (r^2) y menor desvío cuadrático medio. Las edades estimadas, junto con las observadas y los individuos censados, permitieron calcular las frecuencias de individuos establecidos por década.

En todos los análisis el nivel de significancia se fijó en 0,05.

4.2.4 Patrones de liberaciones en el crecimiento

La metodología utilizada para reconstruir el patrón de liberaciones en el crecimiento fue la desarrollada por Nowacki y Abrams (1997). Este método calcula el porcentaje de cambio en el crecimiento año a año sobre las series individuales utilizando la siguiente ecuación:

$$[(M_2 - M_1) / M_1] \times 100$$

donde M_1 es el promedio de ancho de anillos de los 10 años previos incluyendo el año calculado, y M_2 es el promedio de los 10 años siguientes (Fig 4.4). Se consideró como una

liberación a aquel porcentaje de cambio en el crecimiento superior al 25% y que se sostuvo durante al menos tres años consecutivos.

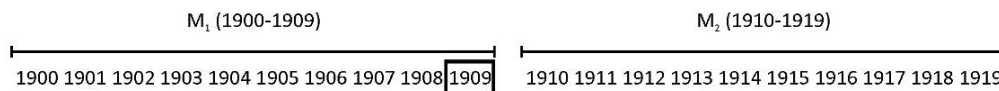


Figura 4.4 Esquema del cálculo del porcentaje del cambio de crecimiento para el año 1909 según la metodología de Nowacki y Abrams (1997)

Además, se calcularon cronologías por sitio a partir del promedio de las series de medición individuales. En estas cronologías también se calcularon los porcentajes de cambio en el crecimiento. Las liberaciones fueron obtenidas utilizando la opción de análisis de dinámica de rodales del programa Arstan 4.1 (opción 20 “stand dynamics stuff”; Cook y Krusic (2006)). La extensión de las liberaciones en el tiempo fue verificada mediante el cálculo de las mismas en planillas de cálculo.

4.3. RESULTADOS

4.3.1 Características estructurales

El resumen de las características estructurales del bosque por sitio se presenta en la Tabla 4.2. La mayor densidad de plántulas se halló en Tromen y en contraposición no se hallaron individuos de esta categoría en Ruka Choroy. Esta variable presentó diferencias significativas entre los sitios analizados a través de un test de Kruskal Wallis ($H=24,23$; $p<0,01$) ya que la misma no presentó una distribución normal. La mayor cantidad de renovales se halló en Minchén y en contraposición no se hallaron individuos de esta categoría en Paso del Arco, Ruka Choroy y Rahue. Solamente hubo mortalidad de renovales en Remeco. La densidad de árboles tuvo un rango de 101 y 963 ind/ha, encontrándose estos valores en Rahue y Minchén respectivamente. La mayor densidad de árboles muertos se encontró en Tromen. En correspondencia con esta variable, la mayor área basal (AB) total (renovales + adultos) vivos también se encontró en Minchén y la mayor cantidad de ejemplares muertos se halló en Tromen. Las densidades de renovales vivos ($H=9,1$; $p=0,08$) y muertos ($H=1,2$; $p=0,42$), adultos vivos ($F=3,65$; $p=0,06$) y muertos ($H=5,89$; $p=0,24$) y AB total de vivos ($F=1,85$;

$p=0,22$) y muertos ($H=8,24$; $p=0,12$) no presentaron diferencias significativas entre sitios. En el caso de las alturas medias dominantes (AMD), el bosque de mayor altura se halló en Minchén mientras que el menor en Remeco. Esta variable presentó diferencias significativas entre sitios a través de un ANOVA ($F=6,75$; $p<0,01$) (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Resumen de las características estructurales por sitio

Sitio	Densidad (ind/ha)				AB total (m ² /ha)			AMD (m)
	Plántulas	Renovales		Adultos		Vivos	Muertos	
		Vivos	Muertos	Vivos	Muertos			
PAR	7166 ± 4833 c	0	0	601 ± 232	6 ± 6	79,03 ± 39,31	0,08 ± 0,08	18 ± 0 bc
REM	5500 ± 1166 c	77 ± 7	14 ± 14	586 ± 149	8 ± 8	66,37 ± 7,94	0,39 ± 0,36	14 ± 0 a
RUC	0 a	0	0	159 ± 60	0	29,87 ± 5,93	0	17 ± 1 ab
MIN	3500 ± 1833 abc	200 ± 70	0	963 ± 119	0	138,25 ± 53,68	0	24 ± 1 d
RAH	166 ± 166 ab	0	0	101 ± 62	0	35,64 ± 18,41	0	21 ± 1 cd
MAP	2333 ± 666 bc	15 ± 15	0	648 ± 238	7 ± 7	95,18 ± 12,48	0,09 ± 0,09	21 ± 4 cd
TRO	18000 ± 5333 c	30 ± 30	0	505 ± 118	163 ± 148	82,51 ± 11,03	6,65 ± 5,45	21 ± 0 cd

AB total : área basal (renovales + adultos); AMD: altura media dominante. Se presentan los valores promedios ± error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas ($p<0,05$)

En el caso de Remeco, único sitio multispecífico, el 100% de los renovales vivos correspondieron a *A. araucana* mientras que el 100% de los muertos a *N. antarctica*. En el caso de los adultos, el 65% de los mismos pertenecieron a *A. araucana*, seguido por *N. antarctica* con un 22%, *A. chilensis* con 10% y *Embothrium coccineum* con el 2%. En el caso del AB total, el 87% correspondió a *A. araucana*, seguida por *A. chilensis* con el 9% y *N. antarctica* con el 4%. Todos los individuos adultos muertos pertenecieron a la especie *N. antarctica*.

La distribución de individuos por clases diamétricas mostró que en todos los sitios las estructuras corresponden al tipo de cohortes múltiples o multi-cohorte (Fig. 4.4; en el Apéndice III se presentan las densidades por clase diamétrica). Específicamente, en Paso del Arco, Remeco y Minchén, las mismas corresponden al tipo exponencial o de J invertida ya que las frecuencias por clases de diámetro disminuyen en forma gradual desde las menores categorías hacia las mayores. En Remeco, Ruka Choroy y Rahue, las distribuciones

correspondieron al tipo irregular. En Nahuel Mapi y Tromen, claramente se distinguieron distribuciones bimodales.

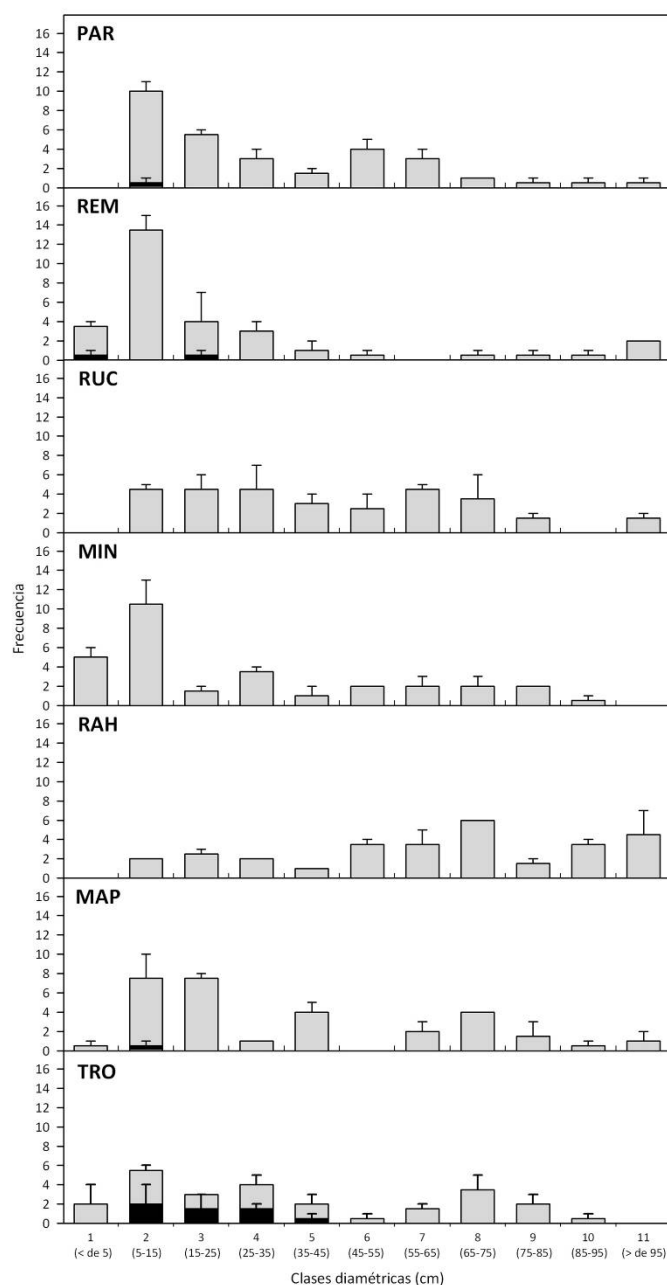


Figura 4.4 Distribución del promedio de renovales y adultos por clases diamétricas de cada sitio (media y SE). Las barras grises representan los individuos vivos mientras que las negras indican los muertos (ver Tabla 4.1 por el código de los sitios).

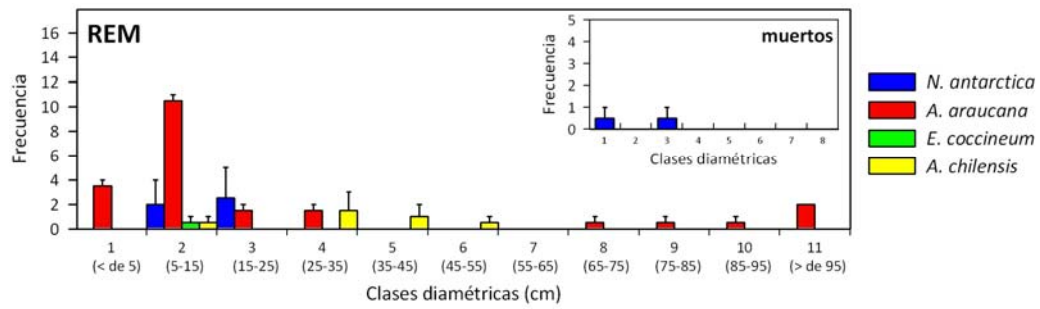


Figura 4.5 Clases diamétricas discriminadas por especie para el sitio Remeco.

Dado que Remeco resultó el único sitio multispecífico, se discriminó la frecuencia de individuos por clase diamétrica por especie (Fig. 4.5). *A. araucana* presentó una distribución bimodal. En el caso de *A. chilensis*, esta especie se distribuyó en las clases medias y *N. antarctica* en las de menor tamaño.

El PCA de los 132 pares de DAP-edad permitió ordenar los sitios en tres grupos en función de sus patrones de variabilidad en el crecimiento (Fig. 4.6). El primero (azul) comprendió únicamente a Remeco, el segundo (rojo) a Ruka Choroy y Rahue y el tercero a Minchén, Nahuel Mapi, Paso Tromen y Paso del Arco.

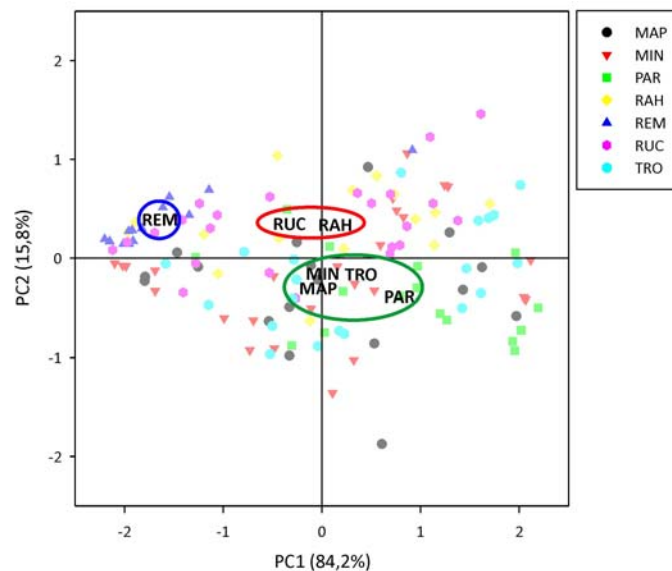


Figura 4.6 Coordenadas de los pares de observaciones DAP-edad de *A. araucana* producto de un análisis de componentes principales (PCA). Se indican los códigos de los sitios en los centroides de las observaciones de los mismos y se presentan con forma de círculos los tres grupos resultantes de su ordenamiento. El nombre los ejes incluye el porcentaje de varianza explicada.

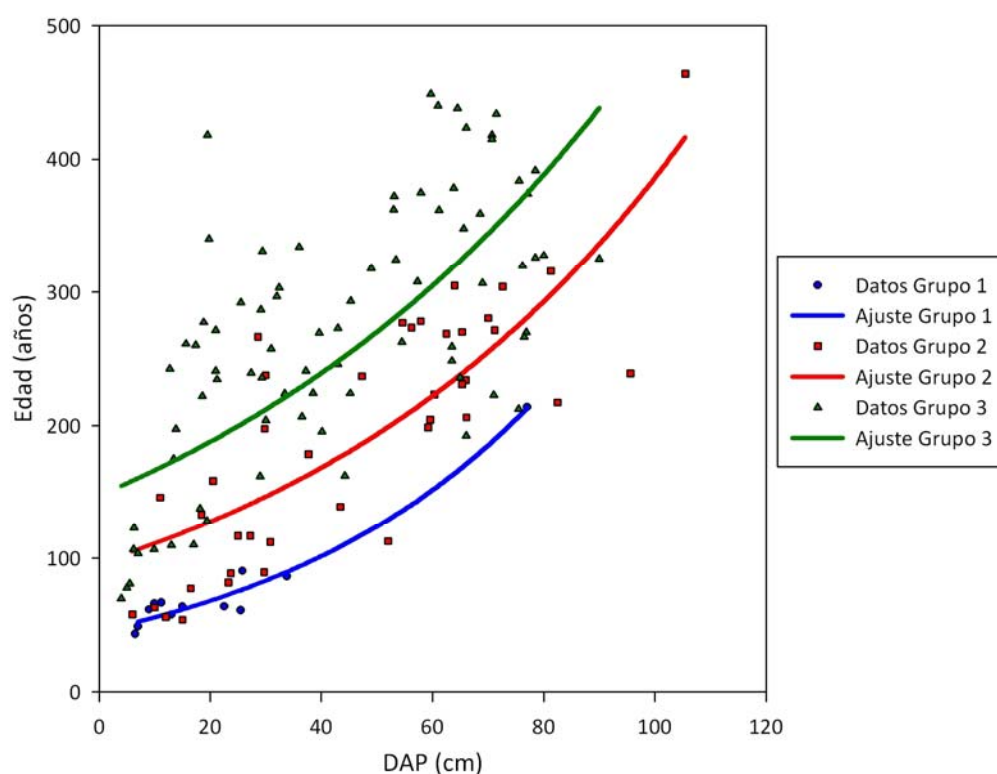


Figura 4.7 Curvas de ajuste para los pares de observaciones DAP-edad de *A. araucana* en función de los tres grupos del ordenamiento del PCA (Fig 4.6).

En función de los tres grupos reconocidos en el PCA, se ajustaron las respectivas curvas exponenciales a los pares de datos DAP-edad (Fig 4.7 y Tabla 4.3). El grado de bondad de ajuste de estas ecuaciones decreció con el número de pares de observaciones en cada uno de ellos.

Tabla 4.3 Características de las ecuaciones exponenciales ($EDAD=a.e^{(b,DAP)}$) ajustadas para *A. araucana*

Grupo	n. obs.	DAP		Parámetros ecuaciones		r^2
		mín	máx	a	b	
1	13	6,5	77,0	45,776	0,0200	0,963
2	40	6,0	105,5	96,929	0,0138	0,656
3	79	4,0	90,0	147,470	0,0121	0,448

n. obs: número de observaciones DAP-edad; mín: DAP mínimo; máx: DAP máximo; r^2 : coeficiente de determinación

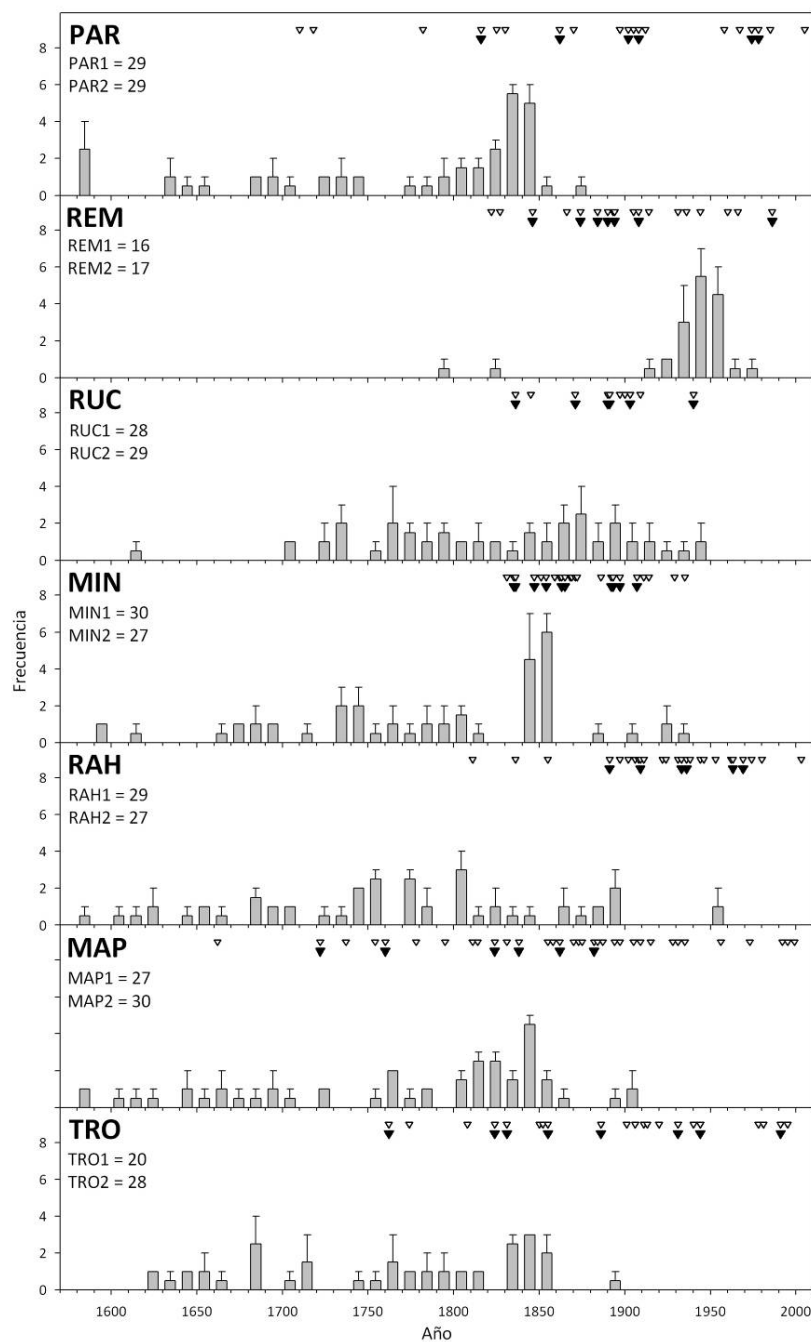


Figura 4.8 Distribución del promedio de individuos según su fecha de establecimiento en cada sitio (barras grises: medias expresadas por décadas y SE). Los triángulos blancos indican todos los eventos de incendios reconstruidos en el Capítulo 3 y los negros aquellos incendios de gran magnitud en cada sitio. En la esquina superior izquierda se presenta el código y el número de individuos que participó del cálculo por parcela.

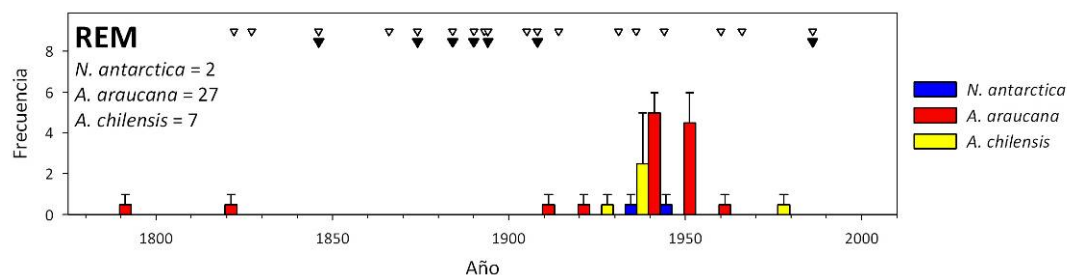


Figura 4.9 Distribución del promedio de individuos discriminados por especie según su fecha de establecimiento en Remeco (medias expresadas por décadas y SE). Los triángulos blancos indican todos los eventos de incendios reconstruidos en el capítulo 3 y los negros aquellos incendios de gran magnitud en este sitio. En la esquina superior izquierda se presenta el número de individuos por especie que participó del cálculo

4.3.2 Establecimiento a nivel de sitios y regional

En función del ordenamiento de los sitios, se aplicó la respectiva ecuación para calcular las edades y consecuentemente la fecha de establecimiento de cada individuo vivo (Fig. 4.8). La discriminación por clases de establecimiento en cada sitio nuevamente demostró la existencia de estructuras de cohortes múltiples en todos ellos. Los diferentes pulsos de instalación podrían asociarse a la ocurrencia de sucesivos incendios. Este hecho se observó principalmente para aquellos fuegos de gran magnitud. El caso más claro resultó en Remeco, en donde la última gran cohorte se instaló luego del período de recurrencia de incendios entre 1850 y comienzos del siglo XX. En este sitio, al discriminar por especie, se observó la presencia de individuos remanentes previos a la instalación de la última cohorte. Ésta se caracterizó por la instalación casi simultánea de *A. araucana*, *A. chilensis* y *N. antarctica* (Fig. 4.9).

Al sumar todos los establecimientos de las parcelas en un solo análisis, se observó una tendencia sostenida de aumento del establecimiento desde 1590 hasta 1840 (Fig. 4.10a). Esta tendencia de aumento desde 1800 también fue acompañada por un aumento en la cantidad de incendios de gran magnitud (dos cicatrices en al menos el 10% de los árboles registradores) reconstruidos a nivel regional a partir de esa fecha. A partir de la década de 1850 se produce una merma en el establecimiento de individuos, tendencia que fue decreciente hasta comienzos del siglo XX. Este patrón de instalación coincide con una gran cantidad de incendios

producidos en la segunda mitad del siglo XIX (ver Capítulo 3). Entre 1900 y 1950 se observó un nuevo aumento en el establecimiento de individuos *A. araucana* a nivel regional.

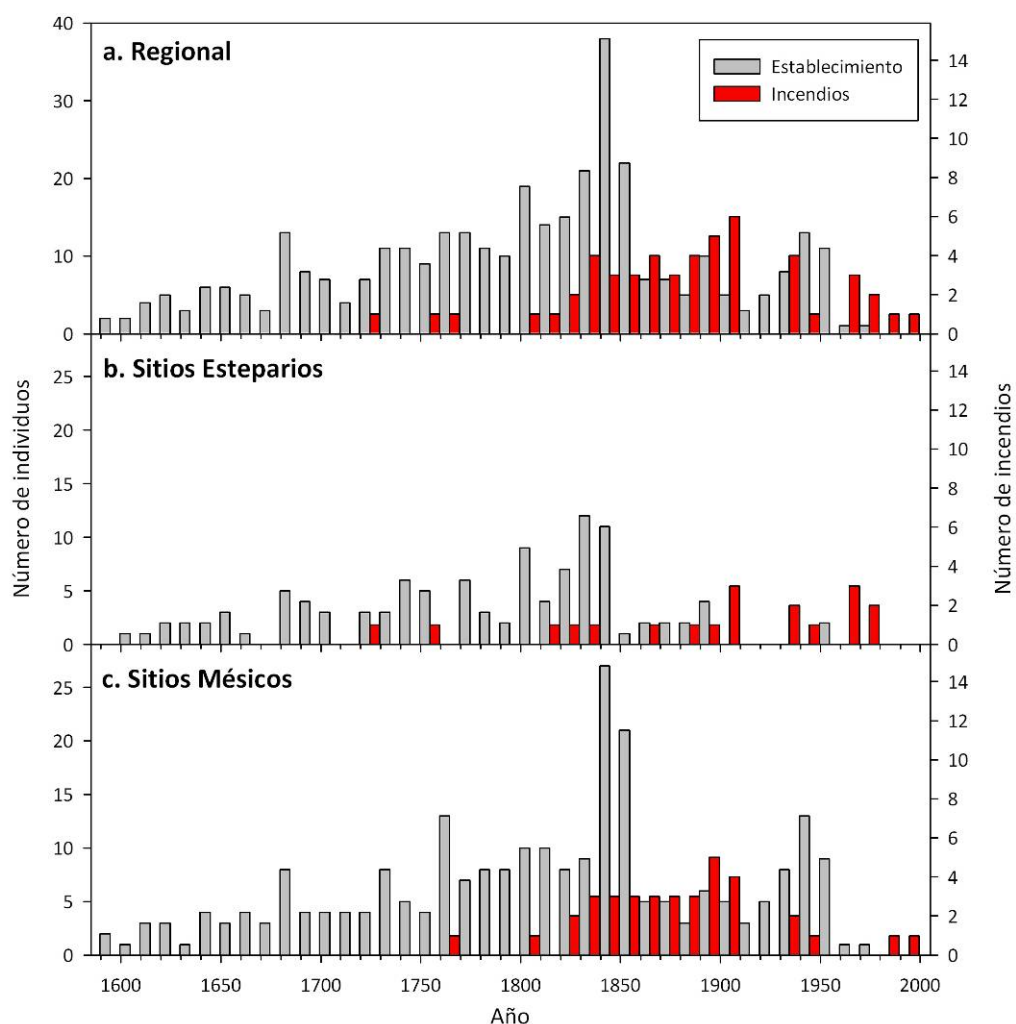


Figura 4.10 Número total de individuos (366) por clase etárea a nivel regional (a), por grupos de sitios esteparios (b) y mésicos (c) producto de la sumatoria por parcelas y número de incendios de gran magnitud (dos cicatrices en al menos 10% de los árboles registradores por sitio) por década en cada escala de análisis.

Al discriminar los sitios por grupos en función de la separación encontrada en el Capítulo 2 a partir de las cronologías de referencia, se observó que el grupo Estepario (sitios: Paso del Arco y Rahue) difiere levemente del análisis regional, aunque se observa una similar tendencia

de aumento hasta 1840 (Fig. 4.10b). El establecimiento de individuos durante el siglo XX en la sumatoria de los dos sitios esteparios es casi nulo, salvo un individuo instalado en 1950. En el caso del grupo Mésico (sitios: Remeco, Ruka Choroy, Minchén, Ea. Nahuel Mapi y Tromen) la tendencia de establecimiento tuvo el mismo patrón que la sumatoria regional, encontrándose una alta cantidad de individuos establecidos en las décadas de 1840 y 1850 (Fig. 4.10b).

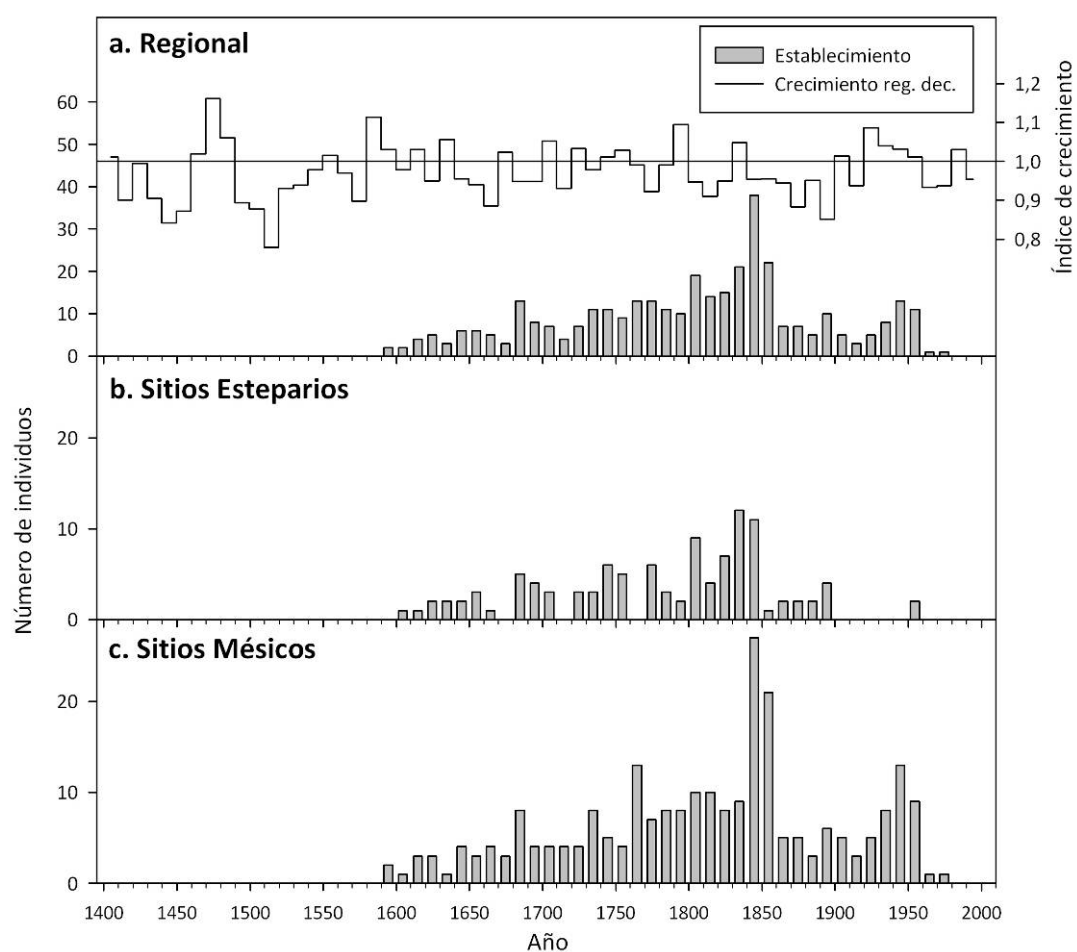


Figura 4.11 Número total de individuos (366) por clases etáreas a nivel regional producto de la sumatoria por parcelas y el índice de crecimiento standard regional promediado por década.

El establecimiento de *A. araucana* a nivel regional no pudo asociarse al crecimiento radial promediado por década (a partir de la cronología standard regional desarrollada en el Capítulo 2) (Fig. 4.11a). Sin embargo, en aquellos años en donde se observaron picos de

establecimiento, los mismos estuvieron precedidos por 10 o 20 años de altas tasas de crecimiento. Por ejemplo, los picos de establecimiento de las décadas de 1680, 1810, 1840 y 1940 estuvieron precedidos por crecimientos superiores a la media en 1670, 1800, 1830 y 1920 respectivamente. Además, el bajo crecimiento regional entre 1850 y 1910 también se podría asociar con el bajo establecimiento entre 1860 y 1920. Al discriminar por grupos de sitios esteparios y mésicos se halló la misma tendencia de asociación con leves variaciones en cada caso.

4.3.3 Patrones de crecimiento

A partir del análisis de los patrones de crecimiento a nivel individual se pudieron calcular los porcentajes de cambio en el crecimiento. De esta manera se detectaron liberaciones superiores al umbral del 25% sostenidas durante al menos tres años consecutivos en el 91% de las muestras analizadas (total: 170). Remeco resultó el sitio con menor porcentaje de muestras con liberaciones sobre el total extraído (69%). A modo de ejemplo, en la Fig. 4.12 se muestra el correlato entre las series de ancho de anillos y el porcentaje de cambio en el crecimiento en dos árboles. En el caso de la serie RUC210 (sitio Ruka Choroy, parcela 2, árbol 10) se detectaron liberaciones en los años 1773, 1787, 1839, 1872, 1902 y 1922 mientras que en MAP128 (sitio Nahuel Mapi, parcela 1, árbol 28) se hallaron cambios en los porcentajes de cambio en el crecimiento en 1827, 1845, 1872, 1897 y 1918. En el apéndice IV se presentan los años de liberaciones del crecimiento para cada individuo analizado por sitio.

Al comparar las fechas de incendios obtenidas en el Capítulo 3 de esta tesis con las liberaciones a nivel individual y de sitio y el establecimiento de individuos se pudo encontrar una clara relación de estas tres variables en la mayoría de los sitios (Fig. 4.13).

Los incendios de gran magnitud de 1902 y de 1974 coincidieron con liberaciones individuales en al menos dos individuos y en la cronología del sitio para esos años en Paso del Arco. Por otra parte, las liberaciones del crecimiento a nivel de sitio en los años 1627, 1669-1682 y 1735 se asociaron con tres pulsos de establecimiento durante las décadas de 1630-60, 1680-1700 y 1730-40. La tendencia de establecimiento ascendente desde 1770 hasta 1840 se produjo en el mismo período en el que hubo cuatro liberaciones individuales coincidentes en

más de dos individuos en los años 1780, 1792, 1819 y 1822. Sin embargo, luego de 1850 se produjeron 10 liberaciones de la misma magnitud, pero no pudo asociarse al establecimiento de individuos ya que desde esa década no se registró la instalación de cohortes en las parcelas de Paso del Arco.

En el caso del sitio de Remeco, el incendio de 1893 pudo asociarse con el pico de liberación a nivel de la cronología del sitio con 53% de cambio en el crecimiento en ese mismo año. Esta liberación fue la única de gran magnitud anterior a la gran instalación de individuos ocurrida entre las décadas de 1910 y 1970. Recién en 1962 se halló concordancia entre liberaciones individuales y de sitio por encima del umbral.

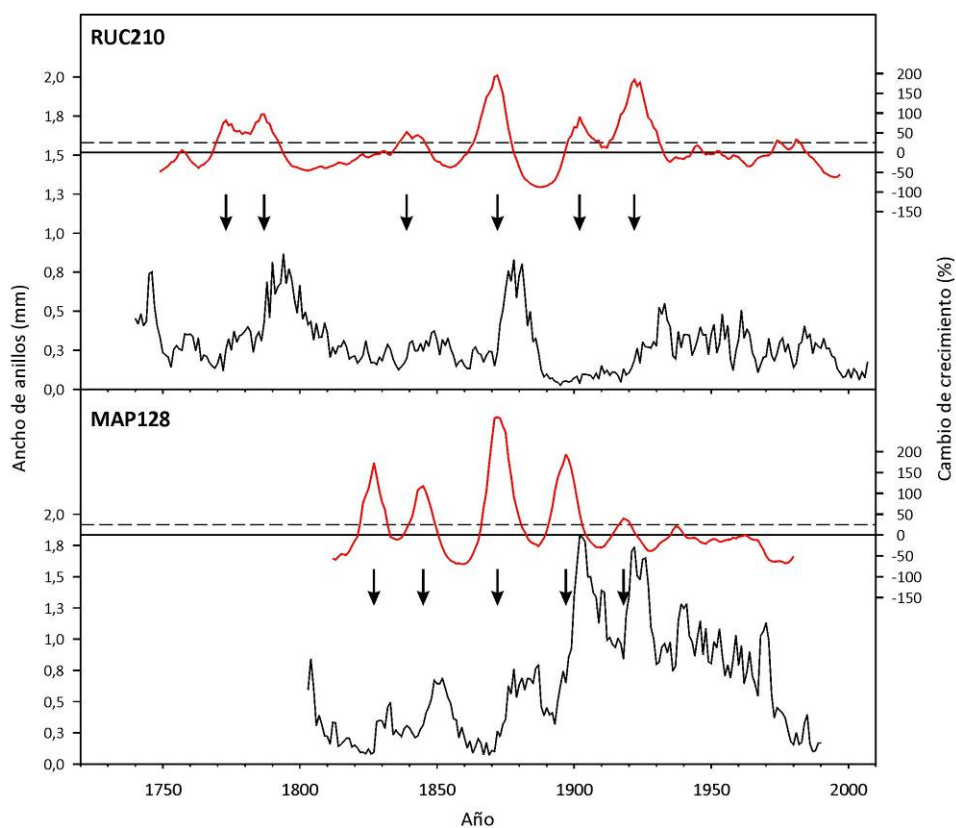


Figura 4.12 Crecimiento radial (líneas negras) y cambio en el crecimiento en porcentaje (líneas rojas) de dos *A. araucana* (en la esquina superior izquierda se presenta el código: identificación del sitio en los primeros tres caracteres y del árbol en los últimos tres números). Las flechas indican liberaciones que superaron el 25% de cambio en el crecimiento durante tres o más años consecutivos. Las líneas horizontales de referencia indican 0% (línea continua) y el 25% (línea punteada) de cambio de crecimiento.

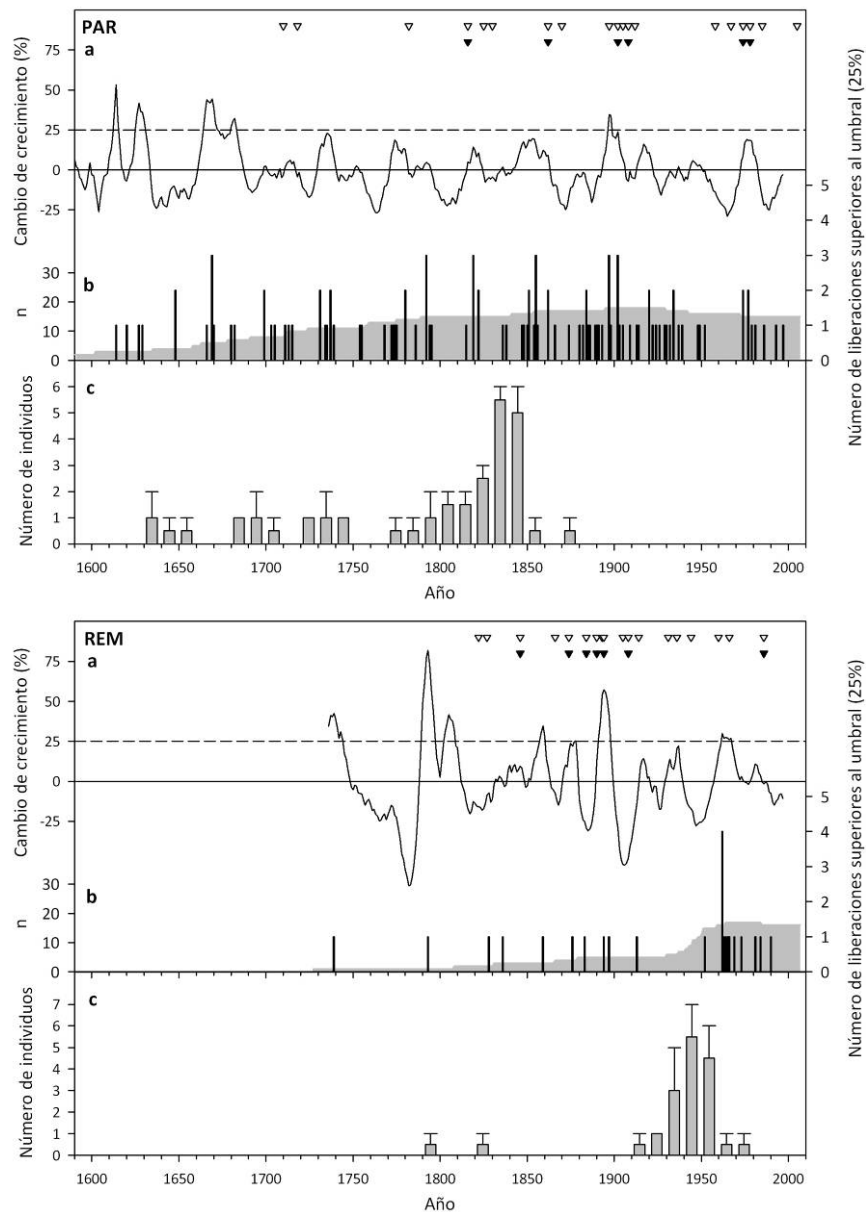


Figura 4.13 Comparación entre el porcentaje de cambio en el crecimiento (% CC) y el establecimiento por rodal: cronología maestra de % CC por sitio (a), número de liberaciones superiores al umbral de 25% durante al menos tres años consecutivos (b) y promedio de individuos establecidos por década (barras con error standard) (c). En la parte superior se presentan las fechas del total de incendios por sitio (triángulos blancos) y de aquellos eventos de gran magnitud que quedaron registrados en al menos dos cicatrices de $\geq 10\%$ de los árboles registradores (triángulos negros). La línea horizontal punteada indica el umbral del 25% en el % CC. El área gris detrás de la frecuencia de liberaciones indica el número de tarugos que participaron en este cálculo.

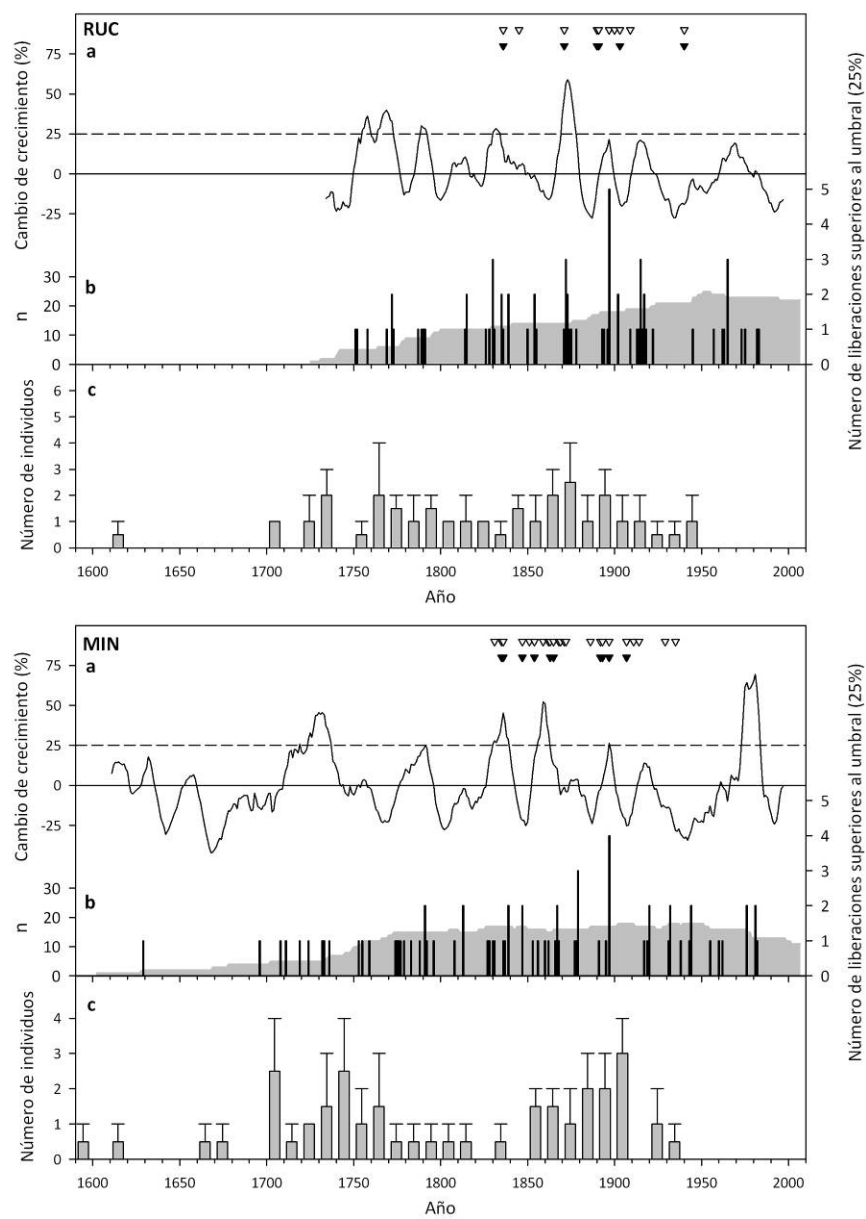


Figura 4.13 Continuación

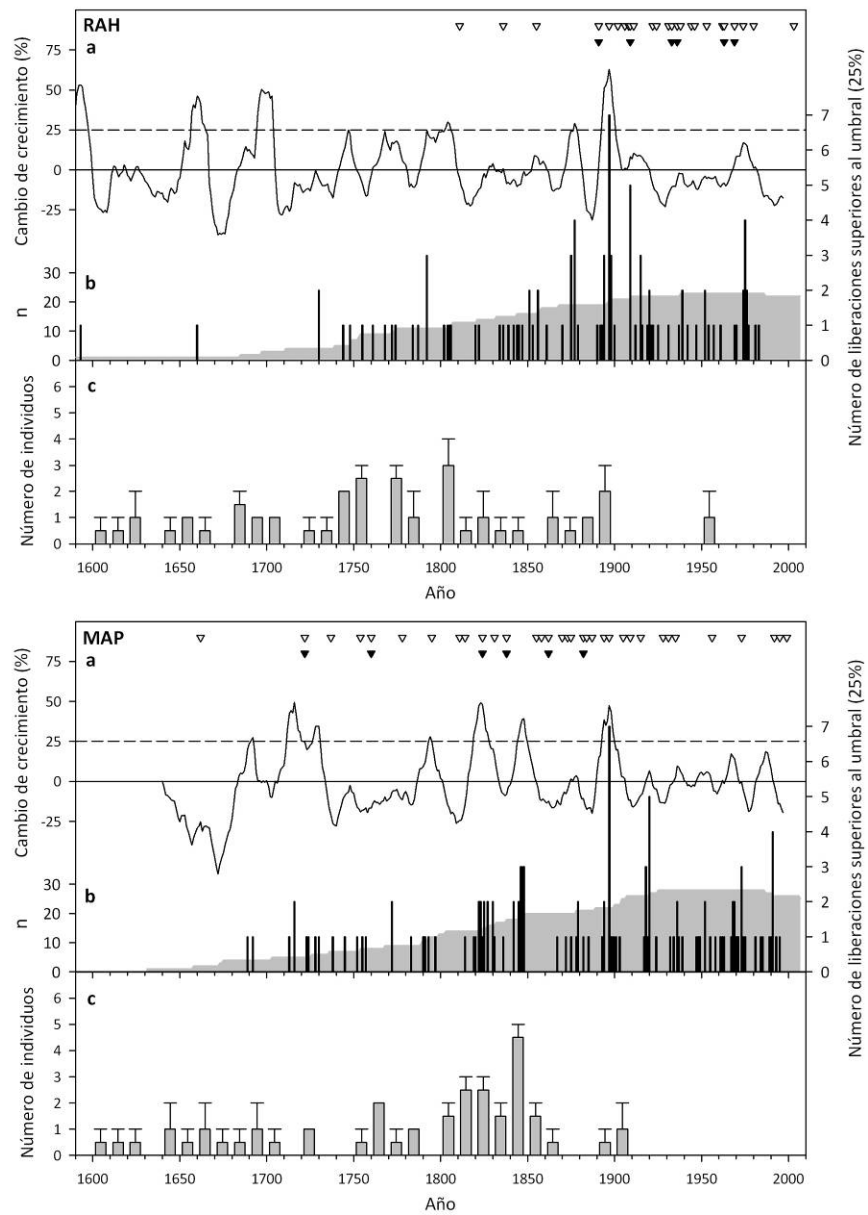


Figura 4.13 *Continuación*

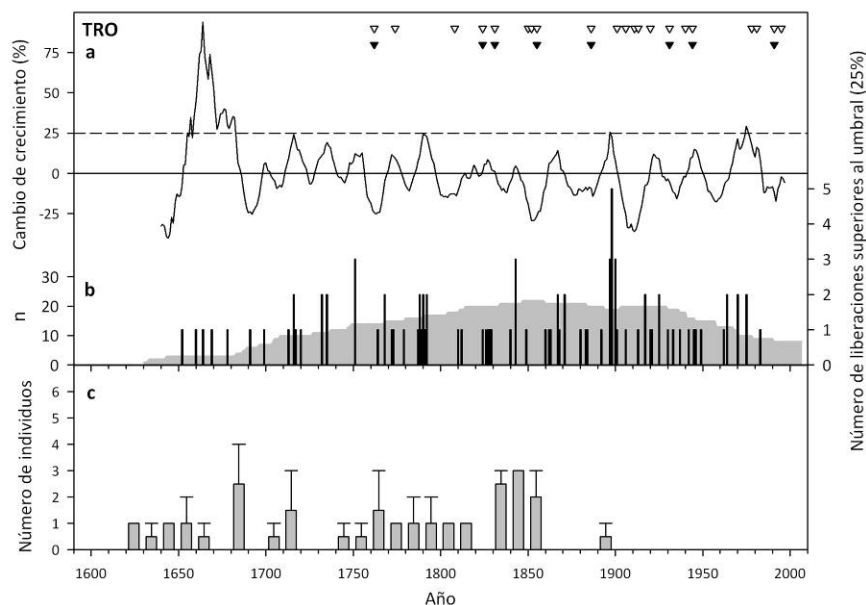


Figura 4.13 Continuación

En Ruka Choroy el incendio de 1871 se asoció con una gran liberación a nivel de sitio y a nivel individual en 1872. Además, la mayor liberación encontrada en ejemplares coincidió con el incendio de 1897. El establecimiento de este sitio también tuvo una estrecha asociación con las liberaciones de crecimiento ya que los picos de instalación de las décadas de 1760, 1790 1840, 1870 y 1890 se vincularon con grandes valores en el porcentaje de cambio en el crecimiento a nivel de sitio en los años 1767, 1789, 1830, 1872 y 1897 respectivamente.

Las liberaciones a nivel de sitio de Minchén en 1836, 1859 y 1897 coincidieron con fuegos reconstruidos dendrocronológicamente en esos mismos años. En el caso particular de 1897, correspondió al año que mayor cantidad de liberaciones individuales registró. Los picos en el establecimiento de individuos en las décadas de 1740 y 1900 se asociaron a altos valores en el porcentaje del cambio en el crecimiento para 1730 y 1897.

En Rahue, los incendios producidos en 1855, 1897, 1908-09, 1938 y 1974 tuvieron su correlato con altas frecuencias en las liberaciones a nivel individual en 1856, 1897, 1909, 1939 y 1975. A diferencia de otros sitios, el patrón de establecimiento no presentó una asociación

clara con las liberaciones del crecimiento. Solamente el pico de instalación en la década de 1890 pudo asociarse a la liberación e incendio de 1897.

El fuego de gran magnitud de 1824 registrado en Nahuel Mapi tuvo su correlato con el pico en el porcentaje de cambio en el crecimiento en ese mismo año y con gran cantidad de liberaciones individuales hasta 1827. Los incendios de 1897 y 1973 quedaron registrados en liberaciones de más de cuatro individuos para los mismos años. Los picos en el establecimiento de individuos en las décadas de 1830 y 1840 podrían vincularse a la alta recurrencia de liberaciones sincronizadas como las de los años 1822, 1823, 1825, 1827, 1830, 1842, 1845, 1846, 1847 y 1848.

El sitio de Tromen resultó ser la única área analizada en donde se encontró un sólo gran pico en el porcentaje del cambio en el crecimiento a nivel de sitio por encima del umbral del 25%. El único fuego coincidente entre la datación por cicatrices de fuego y las liberaciones de crecimiento fue el correspondiente al año 1944. El mayor establecimiento hallado en la década de 1840 coincidió con una alta frecuencia de liberaciones individuales en 1843. El año 1897 fue nuevamente el año con mayor cantidad de liberaciones a nivel individual, aunque no tuvo su correlato con incendios datados y solamente tuvo una menor expresión en el establecimiento de *A. araucana*.

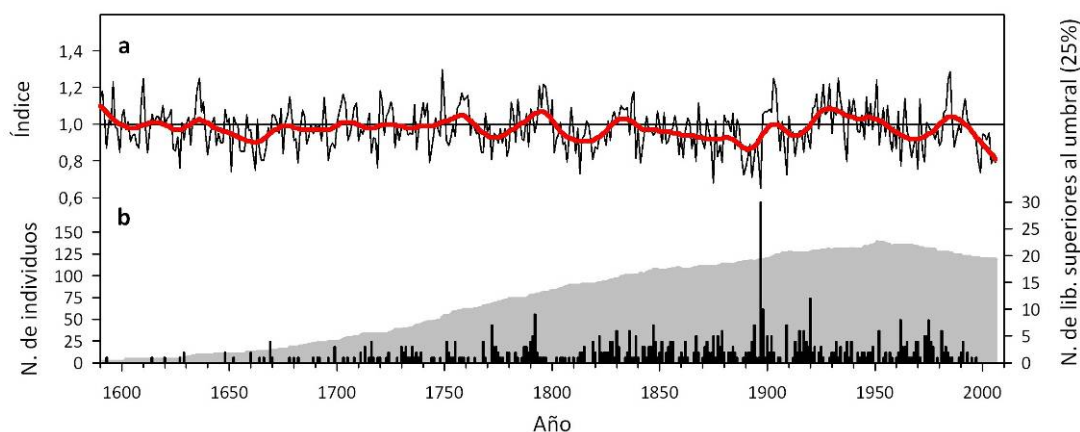


Figura 4.15 Análisis regional del crecimiento standard (a) y número total de liberaciones superiores al umbral del 25% durante al menos tres años consecutivos (b). Se presenta el número de tarugos empleados en la determinación de las liberaciones como un área gris. En color rojo se indica la curva spline de 25 años para el crecimiento regional standard.

Tal como se anticipó a nivel de sitios, 1897 resultó ser el año con mayor cantidad de liberaciones registradas a nivel regional (Fig. 4.15). Al compararlo con el patrón de crecimiento regional standard desarrollado en el Capítulo 2, se observó que este año resultó el de menor incremento radial anual de los últimos 400 años.

Al comparar la frecuencia de liberaciones individuales por décadas con el crecimiento radial en la misma unidad temporal, se observó que la asociación fue estadísticamente significativa y negativa, alcanzando un valor de $r = -0,42$ entre 1590 y 1999 ($r_{(39; 0,05)} = \pm 0,31$) (Fig. 4.15). Por otra parte, la frecuencia del total de incendios datados en el Capítulo 3 por décadas tuvo una correlación significativa con la frecuencia de liberaciones en la misma escala temporal alcanzando un valor de r de 0,68 ($r_{(39; 0,05)} = \pm 0,31$).

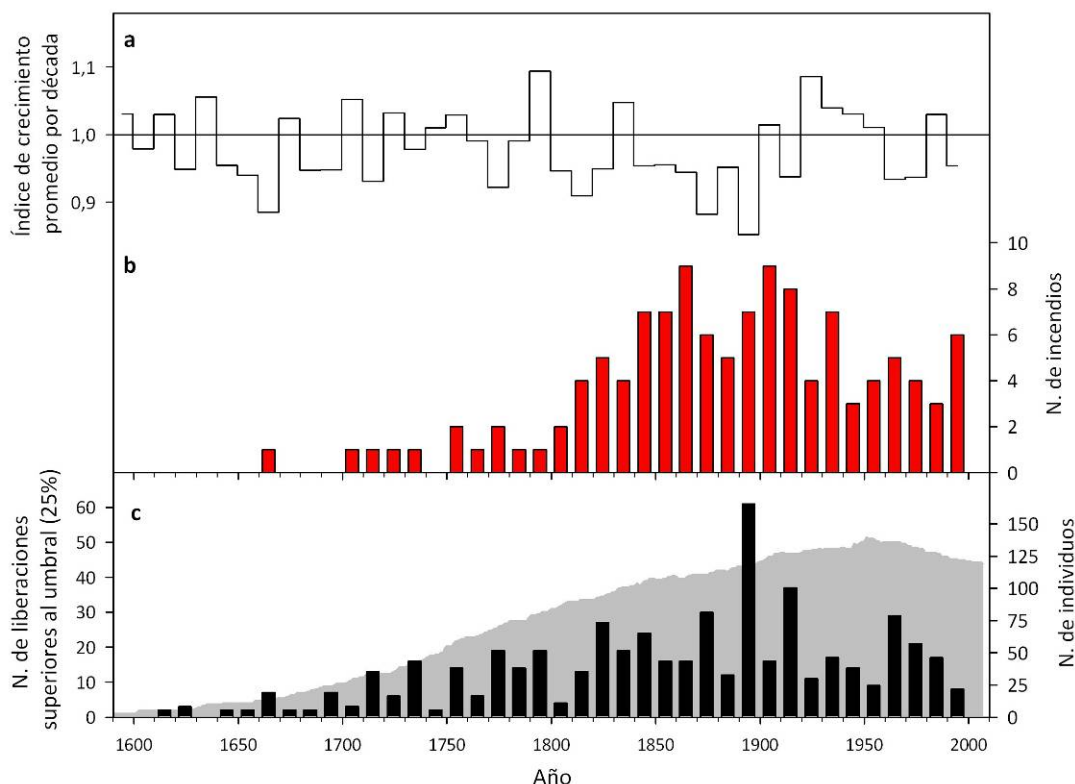


Figura 4.15 Análisis regional por décadas del crecimiento standard (a), número total de incendios fechados por cicatrices (b) y número de liberaciones superiores al umbral del 25% durante al menos tres años consecutivos (c). En este último se presenta el número de tarugos empleados en la determinación de las liberaciones como un área gris.

4.4. DISCUSIÓN

En cuatro sitios con rodales puros de *A. araucana* (Paso del Arco, Ruka Choroy, Nahuel Mapi y Tromen), los valores de densidad de árboles y de área basal total viva encontrados en este estudio estuvieron dentro del rango observado por Burns (1991) (densidad: 310-914 ind/ha y AB: 46,7-102,5 m²/ha). Solamente los valores de Minchén se hallaron por encima y los de Rahue por debajo. Este último caso se debe a su condición netamente esteparia que le otorga características de un bosque muy abierto. En Remeco, por ser un bosque mixto, estas variables asumieron valores algo superiores a los observados por Burns (1991) (densidad: 180-780 ind/ha y AB: 10,8-38,8 m²/ha). A diferencia de los resultados hallados por este autor, salvo en Tromen, en la mayoría de las parcelas se observó muy baja o nula mortalidad.

Los rodales analizados para la reconstrucción de los patrones regionales de historia de incendios mostraron estructuras del tipo multi-cohortes. El análisis por fechas de establecimiento suplementó la información del análisis por clases diamétricas. Tal como establecieron Smith et al. (1997), el diámetro no es un buen criterio de la edad y debe ser utilizado con mucho cuidado. En el caso de Remeco, a través del análisis por clases diamétricas se podría inferir que *A. chilensis* es la especie pionera de la última cohorte, seguida por *A. araucana* y *N. antarctica*. El carácter pionero de *A. chilensis* ha sido observado para otras áreas incendiadas de Patagonia (Seibert 1982). Sin embargo, al analizar por clases etáreas se observó que la instalación de estas tres especies fue casi simultánea. Lamentablemente, por la baja calidad de las muestras de *N. antarctica*, principalmente afectadas por podredumbre central del fuste, esta especie se encontró débilmente representada. De esta manera, la estimación de la frecuencia por clases etáreas de esta especie estaría subestimada en este análisis. Sin embargo, al complementar esta información con el análisis por clases diamétricas en donde se halló poca variabilidad en los tamaños de *N. antarctica*, se podría inferir que todos los individuos de la especie podrían tener las mismas edades. En función de la alta mortalidad registrada en esta misma especie, se podría inferir que *N. antarctica* es un débil competidor frente a *A. araucana* y *A. chilensis*, una vez que el rodal se encuentra establecido. De esta manera, en una observación futura podría esperarse, en ausencia de nuevos disturbios, el desplazamiento y desaparición de

individuos de *N. antarctica* en este rodal multispecífico. En función de la discusión antes planteada, es recomendable el uso combinado de los análisis por clases diamétricas y por fechas de establecimiento a través de técnicas dendrocronológicas en estos bosques. El primero resulta una herramienta expeditiva aunque el segundo brinda mayor precisión. Sin embargo, en función de las características anatómicas de las especies, principalmente de *A. araucana* y *N. antarctica*, se recomienda la extracción de mayor cantidad de tarugos por parcela de estudio.

La comparación del establecimiento por décadas a nivel regional con el número de incendios reconstruidos a partir de las cicatrices de fuego en las secciones transversales parciales, claramente demostró el efecto que ha tenido este disturbio en el modelado de la estructura actual de estos bosques. En términos regionales, la asociación del aumento tanto en el establecimiento como en el número de fuegos hasta 1840 estaría indicando un sinergismo entre ambos procesos. Sin embargo, superado cierto umbral de número de incendios y manteniéndose este número casi constante durante varias décadas, se produjo el descenso en el número de individuos que se establecieron. Los fuegos no solo pudieron haber eliminado árboles maduros capaces de proveer material reproductivo sino que también pudieron haber modificado las características del suelo y del sotobosque de manera de hacerlo un ambiente poco propicio para la germinación de las semillas. Sumado a estos hechos, los sucesivos eventos pudieron haber eliminado aquellas plántulas que lograron instalarse.

Además, las condiciones climáticas que favorecieron el crecimiento regional de la especie también condicionaron el establecimiento en la misma escala a pesar de la respectiva historia de incendios. Dado que las muestras se tomaron a 50 cm de altura, es posible que el defasaje de 10 y 20 años que se halló entre el crecimiento regional por década y el establecimiento pueda ser producto de la técnica de muestreo. De esta manera se podría inferir que los individuos de 50 cm en promedio tendrían entre 10 y 20 años de edad.

Los incendios no solo condicionaron la instalación de las nuevas cohortes sino también afectaron a los árboles remanentes debido a la redistribución de los recursos, del potencial de crecimiento del sitio o "growing space" (*sensu* Oliver y Larson 1996). Los fuegos que afectaron los bosques al eliminar individuos y mineralizar nutrientes del suelo dejaron disponibles

recursos que pudieron ser utilizados por aquellos individuos sobrevivientes. De esta manera, estos ejemplares se vieron favorecidos y pudieron asignar mayor cantidad de fotoasimilados para el crecimiento. En consecuencia, se hallaron anillos de mayor tamaño luego de la ocurrencia de incendios.

Sin embargo, en numerosos años en donde se registraron altas frecuencias de liberaciones del crecimiento no se halló coincidencia entre las fechas de incendios datadas en cada sitio. Posiblemente se hayan producido incendios de superficie o de baja o mediana intensidad y debido a las características de *A. araucana* no hayan sido registrados en los leños por causa de la protección que genera la gruesa corteza sobre el cambium. No debería descartarse la ocurrencia de otro tipo de disturbios, como por ejemplo mortalidad por efecto de sequías, que haya afectado la relación de competencia y, en consecuencia, se haya plasmado en liberaciones en el crecimiento individual.

En función de la relación entre el clima en la zona y el crecimiento regional de *A. araucana* (ver Capítulo 2), la asociación negativa de esta última, como una variable proxy climática, con el número de liberaciones individuales por décadas, permitiría afirmar que la ocurrencia de estos fenómenos se debería a condiciones de altas temperaturas y bajas precipitaciones. Por lo tanto, esta afirmación podría hacer suponer erróneamente que las liberaciones son consecuencia de años con condiciones adversas para el crecimiento y no del efecto de incendios y liberación de recursos. Cabe recordar que a pesar que el método de la media móvil tiende a eliminar los cambios en el crecimiento no asociados a disturbios, las liberaciones sostenidas por pocos años pueden igualmente ocurrir debido a tendencias climáticas de corto plazo (Rubino y McCarthy 2004, Amoroso y Larson 2010). En este estudio, 10 años se consideró un período de tiempo aceptable debido a la falta de prolongados períodos de sequías en la zona. Dado que casi el 70% de los cambios en el crecimiento estuvieron asociados a fuegos, en una comparación de frecuencia por décadas, se debe considerar a este disturbio como el principal causante de estas liberaciones. Además, cabe recordar, como se explicó en el Capítulo 3, que los incendios en la zona tienen principalmente una componente antrópica además de climática.

Dada la baja o nula densidad de plántulas hallada en la mayoría de los sitios y teniendo en cuenta la baja frecuencia de incendios en la última década, se considera que en la actualidad existe otro factor o disturbio que está limitando o impidiendo el establecimiento de *A. araucana*. Durante la realización de los muestreos, en muchos de estos sitios se observó la presencia de ganado vacuno, ovino y caprino. A pesar de no haberse cuantificado esta variable, en la mayoría de los sitios se evidenció la presencia de gran cantidad de heces de ganado y de ramoneo. Se considera que este disturbio no solamente estaría controlando el desarrollo de la regeneración sino también modificando las condiciones del suelo para el establecimiento de nuevos ejemplares de *A. araucana* debido al efecto del pisoteo. A este hecho también se suma la ingesta de semillas por el ganado, predación por cachaña (Sanguinetti 2008, Shepherd et al. 2008), jabalí y roedores (Sanguinetti y Kitzberger 2010), sumado la recolección de semillas por parte de los pobladores. Específicamente, Sanguinetti y Kitzberger (2010) observaron que la predación de semillas de *A. araucana* por parte de jabalíes y roedores se encuentra correlacionada negativamente y en forma significativa con el establecimiento de las plántulas. En la actualidad, todas estas variables, además de los fuegos, deberían ser consideradas como elementos influyentes en la dinámica y conservación de los bosques de *A. araucana* en el norte de la Patagonia argentina.

4.5. BIBLIOGRAFÍA

- Amoroso, M., y B. Larson. 2010. Stand development patterns as a consequence of the mortality in *Austrocedrus chilensis* forests. *Forest Ecology and Management* 259:1981-1992. doi: 10.1016/j.foreco.2010.02.009.
- Balzarini, M., L. González, M. Tablada, F. Casanoves, J. Di Rienzo, y C. Robledo. 2008. Infostat - Manual del Usuario. Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Burns, B. 1991. The regeneration dynamics of *Araucaria araucana*. PhD Thesis, University of Colorado, Department of Geography, Boulder, Colorado, USA.
- Burns, B. 1993. Fire-induced dynamics of *Araucaria araucana*-*Nothofagus antarctica* forest in the Southern Andes. *Journal of Biogeography* 20:669-685.
- Christensen, N. 1985. Shrubland fire regimes and their evolutionary consequences. Páginas 86-100 en S. Pickett y P. White, editores. *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press, New York.
- Cook, E. 1987. The decomposition of tree-ring series for environmental studies. *Tree-Ring Bulletin* 47:37-59.

- Cook, E., y P. Krusic. 2006. ARSTAN_41: A Tree-Ring Standardization Program Based on Detrending and Autoregressive Time Series Modeling, with Interactive Graphics. Tree-Ring Laboratory, Lamont Doherty Earth Observatory of Columbia University, New York.
- Dansereau, P. 1957. The grading of dispersal types communities and their ecological significance. Institut Botanique de l'Université de Montreal, Montreal, Canada.
- Donoso-Zegers, C. 1993. Bosques templados de Chile y Argentina. Editorial Universitaria, Santiago de Chile.
- Duncan, R. 1989. An evaluation of errors in tree age estimates based on increment cores in kahikatea (*Dacrycarpus dacrydioides*). New Zealand Natural Science 16:31-37.
- Fritts, H. 1976. Tree rings and climate. Academic Press, London.
- Fritts, H., y T. Swetnam. 1989. Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments. Advances in Ecological Research 19:111-188.
- Holmes, R. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. Tree-Ring Bulletin 43:69-75.
- Kershaw, K. 1973. Quantitative and dynamic plant ecology, 2º edition. American Elsevier, New York.
- Kienast, F., y F. Schweingruber. 1986. Dendroecological studies in the Front Range, Colorado, U.S.A. Arctic and Alpine Research 18:277-288.
- Mueller-Dombois, D., y H. Ellenberg. 1974. Aims and Methods of Vegetation Ecology. Wiley, New York.
- Nowacki, G., y M. Abrams. 1997. Radial-growth averaging criteria for reconstructing disturbance histories from presettlement-origin oaks. Ecological Monographs 67:225-249.
- Oliver, C., y B. Larson. 1996. Forest Stand Dynamics. John Wiley & Sons, Inc.
- Rozas, V. 2003. Tree age estimates in *Fagus sylvatica* and *Quercus robur*: testing previous and improved methods. Plant Ecology 167:193-212.
- Rubino, D., y B. McCarthy. 2004. Comparative analysis of dendroecological methods used to assess disturbance events. Dendrochronologia 21:97-115.
- Sanguinetti, J. 2008. Producción y predación de semillas, efectos de corto y largo plazo sobre el reclutamiento de plántulas. Caso de estudio: *Araucaria araucana*. Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Comahue, Bariloche.
- Sanguinetti, J., y T. Kitzberger. 2010. Factors controlling seed predation by rodents and non-native *Sus scrofa* in *Araucaria araucana* forests: potential effects on seedling establishment. Biological Invasions 12:689-706.
- Schulman, E. 1956. Dendroclimatic changes in semiarid America. University of Arizona Press, Tucson.
- Searle, S. 1971. Linear Models. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Seibert, P. 1982. Carta de Vegetación de la región de El Bolsón, Río Negro y su aplicación a la planificación del uso de la tierra. Fundación para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Shepherd, J., R. Ditgen, y J. Sanguinetti. 2008. *Araucaria araucana* and the austral parakeet: Predispersal seed predation on a masting species. Revista Chilena de Historia Natural

81:395-401.

- Smith, D., B. Larson, M. Kelty, y P. Ashton. 1997. The practice of Silviculture: applied forest ecology, 9º edition. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Stokes, M., y T. Smiley. 1968. An introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press, Chicago.
- Veblen, T. 1982. Regeneration patterns in *Araucaria araucana* forests in Chile. *Journal of Biogeography* 9:11-28.
- White, A. 1985. Presettlement regeneration patterns in a south-western ponderosa pine stand. *Ecology* 66:589-594.
- White, P., y S. Pickett. 1985. Natural disturbance and patch dynamics: an introduction. Páginas 3-13 *en* S. Pickett y P. White, editores. *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press, New York.
- Yamaguchi, D. 1991. A simple method for cross-dating increment cores from living trees. *Canadian Journal of Forest Research* 21:141-146.

Discusión general

CAPÍTULO 5

Los resultados obtenidos en esta tesis aportan evidencias del rol que ha tenido el fuego como agente de disturbio en los bosques de *Araucaria araucana* de Argentina durante los últimos siglos a través del fechado dendrocronológico de cicatrices de incendios (Capítulo 3), patrones de establecimiento y las liberaciones en el crecimiento radial (Capítulo 4). Además, a través del uso de una cronología regional de la especie (Capítulo 2) como variable proxy climática y de otros registros climáticos y de forzantes que actúan en la zona, se pudo diferenciar al clima de la influencia antrópica como causa principal de estos eventos. Considerando los interrogantes e hipótesis planteados en esta tesis, a lo largo de este capítulo se intentará responder a cada uno de ellos, e integrarlos para una mejor interpretación de los posibles procesos involucrados en los patrones obtenidos.

5.1 CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

A través de la primera hipótesis se planteó lo siguiente: “la recurrencia de los incendios en bosques de *A. araucana* de Argentina aumentó en los últimos siglos debido a un cambio en las actividades de los pobladores (nativos y colonizadores)”. En función de los resultados hallados en esta tesis (Capítulo 2), se puede afirmar que la recurrencia de incendios en estos bosques mostró una tendencia de aumento hasta la década de 1920-1930 y luego un marcado descenso. Restando el porcentaje de fuegos que pudo explicarse por años con condiciones climáticas favorables para la ocurrencia de incendios, la actividad del hombre puede atribuirse como una de las principales causas de estos disturbios. Esta tendencia temporal resultó congruente con lo observado en bosques de *A. chilensis* por Kitberger y Veblen (1997) y Veblen et al. (1999). Estos autores sugieren que la población nativa generaba incendios en los bosques con fines de caza. Posiblemente hacia mediados del siglo XIX se hayan producido cambios en las pautas culturales de la población mapuche. La cría y transporte de ganado a través de los pasos de baja altitud de la zona posiblemente haya generado la necesidad de aclarar el sotobosque a lo que se

sumaría el encendido de hogueras durante los acampes. Hacia fines de la década de 1870 y mediados de la década de 1880 se desarrollaron en Argentina y Chile campañas militares organizadas por los estados nacionales con los objetivos lograr la dominación de la región patagónica. En esas fechas la población mapuche fue confinada a las latitudes de los bosques de *A. araucana* y se produjeron grandes movimientos migratorios, persecuciones y enfrentamiento con los ejércitos de Argentina y Chile. Desde comienzos del siglo XX se observó un descenso en la cantidad de fuegos coincidente con una marcada disminución de la población mapuche. Además, tal como se dijo anteriormente (Capítulo 3), se podría asociar este fenómeno con la culminación del establecimiento europeo durante el cual los fuegos fueron extensivamente empleados para aclarar bosques, especialmente en los del tipo mésico, con el fin de propiciar condiciones para el desarrollo de pasturas para el ganado introducido (Willis 1914). Desde la década de 1930, la falta de fuegos intencionales y la supresión de incendios han sido relativamente efectivas en el mantenimiento de una baja frecuencia de estos disturbios. La alta presión ganadera que comenzó en 1900 también podría haber contribuido a la reducción de los combustibles (pastos y otro material comburente) y, en consecuencia, evitando la ignición y propagación de los incendios. En función de todo esto, se puede aceptar la hipótesis planteada ya que la historia de incendios en estos bosques representa la historia antrópica en la zona.

En la segunda hipótesis se planteó: “el clima como factor determinante del contenido de humedad de la vegetación condiciona la ocurrencia de incendios en la zona”. En función de los resultados del Capítulo 3 y de lo planteado anteriormente para la primera hipótesis de esta tesis, se sugiere que las condiciones climáticas no serían los principales disparadores en la ocurrencia de incendios en la zona. A pesar de ello, y de acuerdo a los datos logrados en esta Tesis, pudo explicarse el 30% de los incendios debido a años con condiciones de bajas precipitaciones y altas temperaturas. Por lo tanto, estudios complementarios a los aquí realizados podrían aportar evidencias que ayuden a consustanciar esta hipótesis.

Los resultados del Capítulo 4 de esta tesis permiten afirmar lo postulado por la tercera hipótesis que establecía lo siguiente: “el fuego, al modificar la estructura de los rodales, favorece la instalación de cohortes y genera cambios en las tasas de crecimiento radial”. El análisis del

establecimiento por décadas mostró sinergismo entre este proceso y las fechas de incendios reconstruidas a partir de las cicatrices de fuego en las secciones transversales parciales. Por otra parte, el análisis del porcentaje del cambio en el crecimiento mostró liberaciones asociadas en muchos casos con esas mismas fechas de incendios. Ambos procesos, tanto el establecimiento como las liberaciones en el crecimiento radial, estarían asociados a modificaciones en la estructura de los rodales debido a la liberación de recursos (agua, luz y nutrientes) y de espacio físico. De esta manera, se acepta la tercera hipótesis.

Por último, en la cuarta hipótesis se planteó la siguiente afirmación: “de comprobarse la hipótesis anterior, los cambios no son similares en todos los sitios ya que dependen de los diferentes regímenes de incendio y de sus estructuras forestales consecuentes”. En el Capítulo 4 se observó que el análisis temporal del establecimiento en cada sitio analizado varió entre ellos debido principalmente a sus diferentes historias de incendios y a las diferentes variables estructurales analizadas (densidad poblacional de plántulas, renovales y adultos; área basal y altura media dominante; ver tabla 4.2). Sin considerar a Remeco, único sitio de bosque mixto, se registraron diferentes patrones de establecimiento a pesar de ser rodales monoespecíficos. Además, dado que los sitios de estudio se distribuyeron dentro del rango de distribución de la especie en Argentina, los niveles de precipitaciones de los mismos fueron diferentes, variando entre 500 y 1098 mm, en función del gradiente este-oeste de esta variable en la zona (ver tabla 2.1). Por lo tanto, las estructuras de estos bosques y las liberaciones del crecimiento son el claro reflejo de las diferentes historias de incendios. En consecuencia, también se acepta esta hipótesis.

5.2 SÍNTESIS ESQUEMÁTICA

En la Fig. 5.1 se presenta un esquema, a modo de síntesis, del enfoque analizado a lo largo de esta Tesis. Tal como fuera desarrollado en capítulos previos, el clima de Patagonia norte es producto de la influencia simultánea de la presencia de la Cordillera de los Andes, que actúa como barrera orográfica a los vientos “westerlies”; de la actividad del Cinturón Ciclónico Antártico y de la celda Pacífica de alta presión del sudeste, siendo éstos dos últimos influenciados por el accionar del fenómeno El Niño-Oscilación Sur y por la Oscilación

Antártica (Capítulo 1). Por otra parte, el hombre a través de diferentes actividades a lo largo de su historia ha generado incendios intencionales o accidentales que resultaron junto al clima, en menor medida, en los principales causantes de los fuegos que afectaron a los bosques de *A. araucana* en Argentina. Generalmente la influencia de los incendios, en función de su intensidad, se reflejó a través de la aparición de cicatrices en los fustes, la muerte de individuos, el aclareo de especies vegetales del sotobosque y la mineralización de nutrientes. Estas últimas tres características produjeron la liberación de recursos y espacio físico. Los árboles remanentes respondieron a esta situación a través de liberaciones en el crecimiento radial y del establecimiento de plántulas, ambas variables analizadas en el Capítulo 4. Las fechas de incendios reconstruidas a través de las cicatrices en secciones transversales parciales (Capítulo 3) permitieron sincronizar liberaciones con años en los que se dataron fuegos. Por otra parte, el clima regional inferido a través de la cronología de crecimiento regional como variable proxy climática tuvo influencia en el establecimiento de la especie (Capítulos 2 y 4). De esta manera, la recurrencia de incendios condujo a estructuras de cohortes múltiples en función de los sucesivos incendios que pudieron ser datados en esta tesis. Por último, el aspecto actual de estos bosques ha sido consecuencia, no sólo de sus respectivas historias de incendios, sino también del efecto de otros posibles disturbios en la zona como por ejemplo, el pastoreo del ganado, la recolección de leña y la cosecha de piñones por parte de los pobladores locales.

5.3 INTERROGANTES PENDIENTES: INVESTIGACIONES FUTURAS

En función de los resultados obtenidos en esta tesis y de la síntesis presentada anteriormente, surgen diversas interrogantes que sientan las bases para futuras investigaciones.

La red de cronologías de ancho de anillos analizadas en esta tesis en función de su calidad en términos de representatividad geográfica, sus estadísticos y la extensión de las mismas genera la posibilidad de utilizarlas en dendroclimatología y en diversos estudios dendrocronológicos como patrones de referencia. En el primer caso, se podrían calibrar los datos climáticos existentes en la zona y generar reconstrucciones de temperatura y precipitación en la zona con 600 años de extensión en función de los estadísticos obtenidos en este estudio. Por otra parte, en función de la sensibilidad de la especie al déficit hídrico, se podría realizar una

reconstrucción del PDSI en la zona tomando como referencia el trabajo recientemente publicado por Christie et al. (2010). En ese trabajo se utilizó una red de cronologías de *A. chilensis* con 657 años de extensión para la reconstrucción del PDSI en la zona de transición templado –mediterránea de Chile. Además, se considera muy factible la calibración y reconstrucción de los caudales de los principales ríos de la zona en un análisis por cuencas. Una primera aproximación en este área del conocimiento fue hecha por Holmes et al. (1979) con las cronologías desarrolladas por LaMarche et al. (1979). La reconstrucción de caudales actualizada y de mayor extensión temporal y cobertura espacial sería de gran utilidad para determinar con certeza las oscilaciones temporales en los caudales y la severidad y duración de las sequías en tendencias de largo plazo. Dado la gran dependencia que posee la provincia del Neuquén con el recurso hídrico, ya sea para la generación de energía y el regadío de sus cultivos, los ríos y arroyos constituyen un recurso de extrema importancia para la economía provincial y el desarrollo y progreso de sus poblaciones.

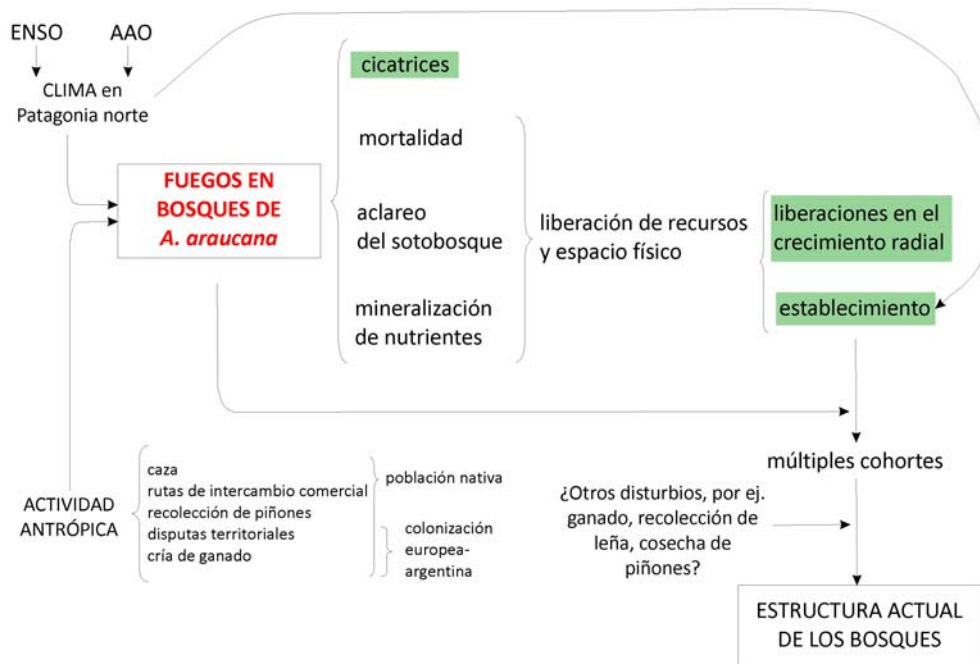


Figura 5.1 Esquema sintético del efecto del fuego en los bosques de *A. araucana* de Argentina en función de sus posibles causas, evidencias de su acción y consecuencia de este tipo de disturbio en la estructura actual de los rodales. Las flechas indican relaciones de causalidad. Los cuadros verdes indican las evidencias analizadas en esta tesis.

Por otra parte, con el objetivo de lograr una interpretación regional con aún más detalle, sería recomendable extender la red de cronologías de incendios hacia zonas aún no exploradas. Por ejemplo, se podrían realizar muestreos en las proximidades del Lago Quillén y Hui-Hui y en contraposición en áreas más esteparias como los bosques en los faldeos del cerro Chachil.

Dada la importante componente antrópica inferida en el registro de incendios reconstruido en esta estudio, futuros trabajos deberían vincular estos resultados con investigaciones etnográficas, sociológicas e históricas de las comunidades mapuches. Estudios interdisciplinarios permitirían abordar esta temática desde diferentes puntos de vista y así lograr una mejor interpretación de esta problemática.

Considerando los estudios previos desarrollados en Chile por González et al. (2005) y Quezada (2008), futuros trabajos deberían integrar los resultados generados en esta tesis con esos resultados previos de manera de lograr una interpretación completa en toda el área de distribución de *A. araucana*. De esta manera, se podría analizar la sincronía de incendios, la influencia climática y antrópica en un área de mayor tamaño, consiguiendo una interpretación más acabada de la importancia del fuego en la dinámica de la especie en Argentina y Chile.

En función de las observaciones realizadas en el campo y de la baja tasa de establecimiento observado desde mediados del siglo XX en adelante, futuros trabajos deberían analizar el rol del pastoreo en estos bosques. Para ello, se podría cuantificar la carga ganadera actual mediante los registros existentes o estimaciones a través del número y tipo de excreciones, el ramoneo y el grado de compactación producto del pisoteo, entre otras. A modo de comparación, se podrían establecer parcelas de clausura de manera de controlar estas variables y seguir su evolución en el tiempo. Por otra parte, también se podría analizar el rol que ha tenido el hombre recolectando detritos gruesos para su uso como leña. ¿Han cambiado las condiciones edáficas debido a la falta de detritos que disminuyen el escurrimiento superficial y favorecen la infiltración? ¿Existen evidencias de erosión por esta causa? ¿Cambiaron las condiciones necesarias para la germinación y establecimiento de *A. araucana*?

Todas estas hipótesis e interrogantes permitirían aportar más evidencias para el entendimiento del funcionamiento de estos bosques y formular prácticas de manejo y de

concientización que permitan garantizar la perdurabilidad de este invaluable recurso para las generaciones futuras.

5.4 BIBLIOGRAFÍA

- Christie, D., J. Boninsegna, M. Cleaveland, A. Lara, C. Le Quesne, M. Morales, M. Mudelsee, D. Stahle, y R. Villalba. 2010. Aridity changes in the Temperate-Mediterranean transition of the Andes since ad 1346 reconstructed from tree-rings. *Climate Dynamics* - online first. doi: 10.1007/s00382-009-0723-4.
- González, M. E., T. Veblen, y J. S. Sibold. 2005. Fire history of Araucaria-Nothofagus forests in Villarrica National Park, Chile. *Journal of Biogeography* 32:1187-1202.
- Holmes, R. L., C. W. Stockton, y V. LaMarche. 1979. Extension of river flow records in Argentina from long tree-ring chronologies. *Journal of the American Water Resources Association* 15:1081-1085.
- Kitzberger, T., y T. Veblen. 1997. Influences of humans and ENSO on fire history of Austrocedrus chilensis woodlands in northern Patagonia, Argentina. *Écoscience* 4:508-520.
- LaMarche, V., R. Holmes, P. Donwiddie, y L. Drew. 1979. Tree-ring chronologies of the southern hemisphere. University of Arizona.
- Quezada, J. 2008. Historia de incendios en bosques de Araucaria araucana (Mol.) Koch del Parque Nacional Villarrica, a partir de anillos de crecimiento y registros orales. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia.
- Veblen, T., T. Kitzberger, R. Villalba, y J. Donnegan. 1999. Fire history in Northern Patagonia: the roles of humans and climatic variation. *Ecological Monographs* 69:47-67.
- Willis, B. 1914. El Norte de la Patagonia. Dirección de Parques Nacionales, Buenos Aires.

La Plata, 14 de febrero de 2011

Ing. Ftal Ignacio A. Mundo

Dr. Fidel A. Roig Juárez
Director

Dr. Marcelo D. Barrera
Codirector

APÉNDICES

APÉNDICE I: FECHAS DE INCENDIOS DE LAS SECCIONES PARCIALES COFECHADAS

(ver Capítulo 3 por el detalle de los códigos)

Sitio	Muestra	Inicio	Fin	Años de cicatrices con su categoría de estacionalidad
CAV	CAV01	1935	2006	1967U
	CAV02	1894	2005	1909U, 1922U, 1931U, 1944U
	CAV03A	1918	2006	1967U, 1978U
	CAV04A	1931	2006	1967L
	CAV05	1747	2005	1918E, 1944U, 1993U
	CAV06	1762	2006	1909U
	CAV07	1817	2006	1824U, 1859U, 1907E, 1937U
PAR	PAR01	1817	2007	1825U, 1902E
	PAR02A	1878	2007	1902U, 1967U, 1985U, 2005U
	PAR03	1620	2007	1974E
	PAR04B	1812	2007	1816U
	PAR06	1534	2007	1902U, 1958U
	PAR07	1776	2007	1908U
	PAR08	1751	2007	1978U
	PAR09	1735	2007	1978U
	PAR10	1863	2007	1897U
	PAR11	1881	2007	1905U
	PAR15B	1827	2007	1830E, 1974U
	PAR16	1697	2007	1710U, 1718E, 1816U
	PAR18	1791	2007	1782U
	PAR19A	1847	2007	1862U
	PAR20	1831	2007	1862U
	PAR21	1853	2007	1862U
	PAR22	1825	2007	1870U, 1908E, 1912E
REM	REM01	1827	2005	1884U, 1894U
	REM02	1857	2005	1874U
	REM04	1838	2005	1874U, 1894U
	REM05	1861	2005	1908E, 1914U
	REM06	1880	2007	1884U, 1931U, 1936U, 1944U, 1960U, 1966U
	REM07	1868	2007	1874U
	REM08	1877	2007	1890U
	REM09	1834	2007	1874U, 1890U

Apéndices

Sitio	Muestra	Inicio	Fin	Años de cicatrices con sus categorías de estacionalidad
REM	REM10A	1874	2007	1890U
	REM11	1784	2007	1822U, 1827E, 1874E
	REM12A	1843	2007	1866U, 1874E
	REM13	1880	2007	1986E
	REM14	1773	2007	1846U, 1986E
	REM15	1826	2007	1846U
	REM16	1844	2007	1846U
	REM17	1876	2007	1908E
	REM18	1829	2007	1846U, 1874U
	REM19	1836	2007	1893M
	REM20	1862	2007	1905M
NOR	NOR01	1878	2006	1878M
	NOR02	1856	2006	1986L
	NOR03	1844	2006	1986E, 1998U
	NOR04	1862	2006	1861U, 1986U
	NOR05	1823	2006	1819M, 1893E, 1986M
	NOR06B	1710	2006	1827U, 1896E, 1919E, 1986E
	NOR08	1834	2006	1871M
	NOR10	1850	2006	1852E, 1986E
	NOR11	1802	2006	1802E, 1986M
	NOR12	1836	1986	1836E, 1986M
	NOR14	1836	2006	1836M
	NOR15	1803	2004	1844M, 1875E
	NOR17	1869	1997	1875M, 1986M
	NOR18	1867	2006	1875M
	NOR19	1802	2006	1802E, 1986M
	NOR20	1801	2006	1802U
	NOR21B	1869	2004	1871U, 1986U
	NOR22	1899	2006	1909M, 1919M, 1986U
	NOR23	1856	2006	1986M
	NOR24	1820	2006	1827U, 1890M
	NOR25	1833	2006	1842U
	NOR26	1827	2006	1827M
	A97-34	1850	1996	1874U, 1894U
	A97-100	1765	1996	1874E, 1894U
	A97-102	1893	1996	1887U, 1894U
	A97-103B	1824	1996	1827U, 1874E, 1894E
	A97-104	1784	1996	1856E
	A97-105	1789	1996	1893E
	A97-106	1893	1985	1893U

Sitio	Muestra	Inicio	Fin	Años de cicatrices con sus categorías de estacionalidad
NOR	A97-107	1838	1996	1854U, 1928M, 1937U, 1966E
	A97-108	1888	1981	1942E
RUC	RUC2-01	1891	2006	1891U
	RUC2-02	1884	2006	1891L
	RUC2-03	1836	2006	1900U, 1891L, 1871M, 1836U
	RUC2-04	1873	2006	1891E
	RUC2-05	1876	2006	1891U
	RUC2-06	1861	2006	1836U
	RUC2-07	1844	2006	1890L
	RUC2-09	1861	2006	1909U, 1890M
	RUC2-10	1912	2006	1940M
	RUC2-13	1890	2006	1890M
	RUC2-14	1871	2006	1871E
	RUC2-15	1632	2006	1903E, 1871U, 1836U
	RUC2-16	1900	2006	1903U
	RUC2-17	1744	2006	1871M, 1836E
	RUC2-18	1871	2006	1871U
	RUC2-19	1867	2006	1940U
	RUC2-21	1833	2006	1891U, 1845U
	RUC2-22	1833	2006	1890U
	RUC2-23	1829	2006	1897L, 1890M
MIN	RUC01	1761	2006	1897U
	RUC03	1730	2006	1835U, 1892M, 1897U, 1907U
	RUC04	1766	2006	1835U, 1863U
	RUC05	1850	2006	1871U, 1907U
	RUC06	1861	2006	1886U, 1897E, 1907U, 1929E, 1935L
	RUC09	1854	2006	1854U, 1868U, 1907E,
	RUC10	1820	2006	1847U, 1854U, 1863U
	RUC11	1885	2006	1893M, 1911E,
	RUC12A	1859	2006	1892L
	RUC13	1819	2006	1847U, 1892M
	RUC14	1892	2006	1892M
	RUC15	1835	2006	1836M, 1892M
	RUC16	1870	2006	1892E
	RUC17	1832	2006	1836E
	RUC18	1903	2006	1907U
	RUC19	1747	2003	1859U
	RUC21	1793	2006	1851E, 1869?
	RUC23	1755	2006	1872U, 1892U
	RUC25	1888	2006	1892U

Apéndices

Sitio	Muestra	Inicio	Fin	Años de cicatrices con sus categorías de estacionalidad
MIN	RUC26	1858	2006	1862M, 1892U
	A97-110	1837	1996	1865U, 1897U
	A97-112	1876	1996	1897U
	A97-114	1804	1996	1831U, 1865D, 1897D
	A97-115	1826	1996	1863U, 1914U
	A97-116B	1893	1996	1893U, 1897U
	A97-117	1880	1996	1893U, 1897U
	A97-119	1817	1996	1847E, 1897M, 1929E
PIN	PIN04	1765	2006	1867U
	PIN05B	1767	2006	1841U, 1859U, 1907U
	PIN06	1850	2006	1967E
	PIN08	1908	2005	1912U
	PIN09D	1924	2006	1962U
	PIN10	1870	2006	1871U, 1894E
	PIN11	1860	2006	1904U
	PIN12	1799	2006	1841U, 1859U, 1904U
	PIN13	1903	2006	1904U
	PIN14	1891	2006	1904U
	PIN15	1820	2006	1867U, 1871E
	PIN16	1843	2006	1859E, 1907U
	PIN17	1840	2005	1841U, 1867U
	PIN18	1894	2006	1894U
RAH	RAH01B	1887	2007	1936U
	RAH02	1925	2007	1936E
	RAH04	1770	2007	1891U, 1909U
	RAH05	1828	2007	1855U, 1891U
	RAH06	1735	2007	1891U, 1908U, 1909U, 1922U, 1953U, 1969U, 2003U
	RAH07	1771	2007	1891U, 1906U
	RAH08	1778	2006	1902U
	RAH09	1899	2007	1909U, 1974E
	RAH10	1813	2003	1909U, 1933U, 1969E, 1980E,
	RAH11	1770	2007	1924E, 1938E, 1946U, 1962E, 1963E
	RAH12	1797	2007	1811U, 1836U,
	RAH14	1774	2007	1909U
	RAH15	1807	2007	1897U
	RAH16	1844	2007	1891U
	RAH17	1891	2007	1891U, 1936U
	RAH18	1930	2007	1963E
	RAH20	1831	2007	1933U
	RAH21	1860	2007	1891U, 1931U, 1944U

Sitio	Muestra	Inicio	Fin	Años de cicatrices con sus categorías de estacionalidad
RAH	RAH22	1884	2007	1911U
MAP	MAP01C	1722	2005	1722U, 1795U, 1831U, 1875U, 1897U
	MAP02A	1844	2004	1855E
	MAP03	1441	2006	1441U, 1494U, 1811U
	MAP04	1600	2006	1662U
	MAP07	1825	2006	1838U
	MAP08	1825	2006	1909U
	MAP09	1805	2006	1882E, 1928U
	MAP10	1720	2006	1778U, 1824U
	MAP11	1864	2006	1935U, 1956U, 1973U, 1992U, 1999U
	MAP12	1746	2006	1870U, 1905U
	MAP13	1710	2006	1862E
	MAP15	1698	2006	1814U, 1858U, 1887U
	MAP16	1825	2006	1956E
	MAP17	1852	2006	1873U, 1894U, 1931U, 1935U
	MAP18	1950	2006	1995E
	MAP19	1570	2005	1737U, 1760U
	MAP21	1775	2006	1838M
	MAP22	1853	2006	1862U
	MAP23	1848	2006	1862U
	MAP26	1802	2006	1882U, 1909U
	MAP63	1581	2005	1722E
	MAP64	1795	2005	1824E, 1884E
	MAP65	1613	2005	1754E
	MAP66	1618	2005	1760E
TRO	TRO02	1940	2006	1944U
	TRO05	1934	2006	1944U, 1981U
	TRO06	1855	2006	1855U
	TRO08	1800	2006	1850U, 1901U
	TRO09	1762	2006	1762U, 1906U
	TRO10	1840	2006	1940U
	TRO11	1816	2006	1944U
	TRO12B	1761	2004	1824U, 1944U
	TRO13	1792	2006	1808U, 1824U, 1944U
	TRO16	1825	2006	1831U, 1911E, 1931E
	TRO17	1761	2006	1762U, 1774U, 1831U, 1852U, 1886U, 1913U, 1931U , 1978U
	TRO18	1880	2006	1886E, 1991U, 1995E
	TRO19	1925	2006	1944E, 1991U
	TRO21	1935	2006	1944U
	TRO22	1920	2006	1920U

Apéndices

Sitio	Muestra	Inicio	Fin	Años de cicatrices con sus categorías de estacionalidad
TRO	TRO23	1844	2006	1855U

APÉNDICE II: RESUMEN DE FECHAS DE INCENDIO POR SITIO

(ver Capítulo 3 por el detalle del código de los sitios)

Sitio	Año de incendio	Número de cicatrices	Número de árboles registradores	% de árboles registradores	Intervalo de fuego
CAV	1824	1	1	100	.
	1859	1	1	100	35
	1907	1	1	100	48
	1909	2	3	67	2
	1918	1	4	25	9
	1922	1	4	25	4
	1931	1	4	25	9
	1937	1	4	25	6
	1944	2	4	50	7
	1967	3	7	43	23
	1978	1	7	14	11
	1993	1	7	14	15
PAR	1710	1	1	100	.
	1718	1	1	100	8
	1782	1	2	50	64
	1816	2	3	67	34
	1825	1	4	25	9
	1830	1	5	20	5
	1862	3	8	38	32
	1870	1	9	11	8
	1897	1	10	10	27
	1902	3	12	25	5
	1905	1	13	8	3
	1908	2	14	14	3
	1912	1	14	7	4
	1958	1	14	7	46
	1967	1	14	7	9
	1974	2	15	13	7
	1978	2	17	12	4
	1985	1	17	6	7
	2005	1	17	6	20
REM	1822	1	1	100	.
	1827	1	1	100	5
	1846	4	5	80	19
	1866	1	6	17	20

Apéndices

Sitio	Año de incendio	Número de cicatrices	Número de árboles registradores	% de árboles registradores	Intervalo de fuego
REM	1874	7	10	70	8
	1884	2	12	17	10
	1890	3	14	21	6
	1893	1	15	7	3
	1894	2	15	13	1
	1905	1	16	6	11
	1908	2	18	11	3
	1914	1	18	6	6
	1931	1	18	6	17
	1936	1	18	6	5
	1944	1	18	6	8
	1960	1	18	6	16
	1966	1	18	6	6
	1986	2	19	11	20
NOR	1802	3	3	100	.
	1819	1	4	25	17
	1827	4	8	50	8
	1836	2	10	20	9
	1842	1	11	9	6
	1844	1	12	8	2
	1852	1	13	8	8
	1854	1	14	7	2
	1856	1	15	7	2
	1861	1	16	6	5
	1871	2	18	11	10
	1874	3	20	15	3
	1875	3	22	14	1
	1878	1	23	4	3
	1887	1	24	4	9
	1890	1	24	4	3
	1893	4	26	15	3
	1894	3	26	12	1
	1896	1	26	4	2
	1909	1	27	4	13
	1919	2	27	7	10
	1928	1	27	4	9
	1937	1	27	4	9
	1942	1	28	4	5
	1966	1	28	4	24

Sitio	Año de incendio	Número de cicatrices	Número de árboles registradores	% de árboles registradores	Intervalo de fuego
NOR	1986	13	30	43	20
	1998	1	22	5	12
RUC	1836	4	4	100	.
	1845	1	5	20	9
	1871	6	8	75	26
	1890	4	12	33	19
	1891	7	16	44	1
	1897	1	16	6	6
	1900	1	16	6	3
	1903	2	17	12	3
	1909	1	17	6	6
	1940	2	19	11	31
MIN	1831	1	1	100	.
	1835	2	3	67	4
	1836	2	5	40	1
	1847	3	8	38	11
	1851	1	8	13	4
	1854	2	10	20	3
	1859	1	11	9	5
	1862	1	12	8	3
	1863	3	13	23	1
	1865	2	14	14	2
	1868	1	14	7	3
	1869	1	14	7	1
	1871	1	15	7	2
	1872	1	16	6	1
	1886	1	17	6	14
	1892	9	21	43	6
	1893	3	24	13	1
	1897	9	26	35	4
	1907	5	27	19	10
	1911	1	27	4	4
	1914	1	27	4	3
	1929	2	27	7	15
	1935	1	27	4	6
PIN	1841	3	3	100	.
	1859	3	4	75	18
	1867	3	6	50	8
	1871	2	7	29	4

Apéndices

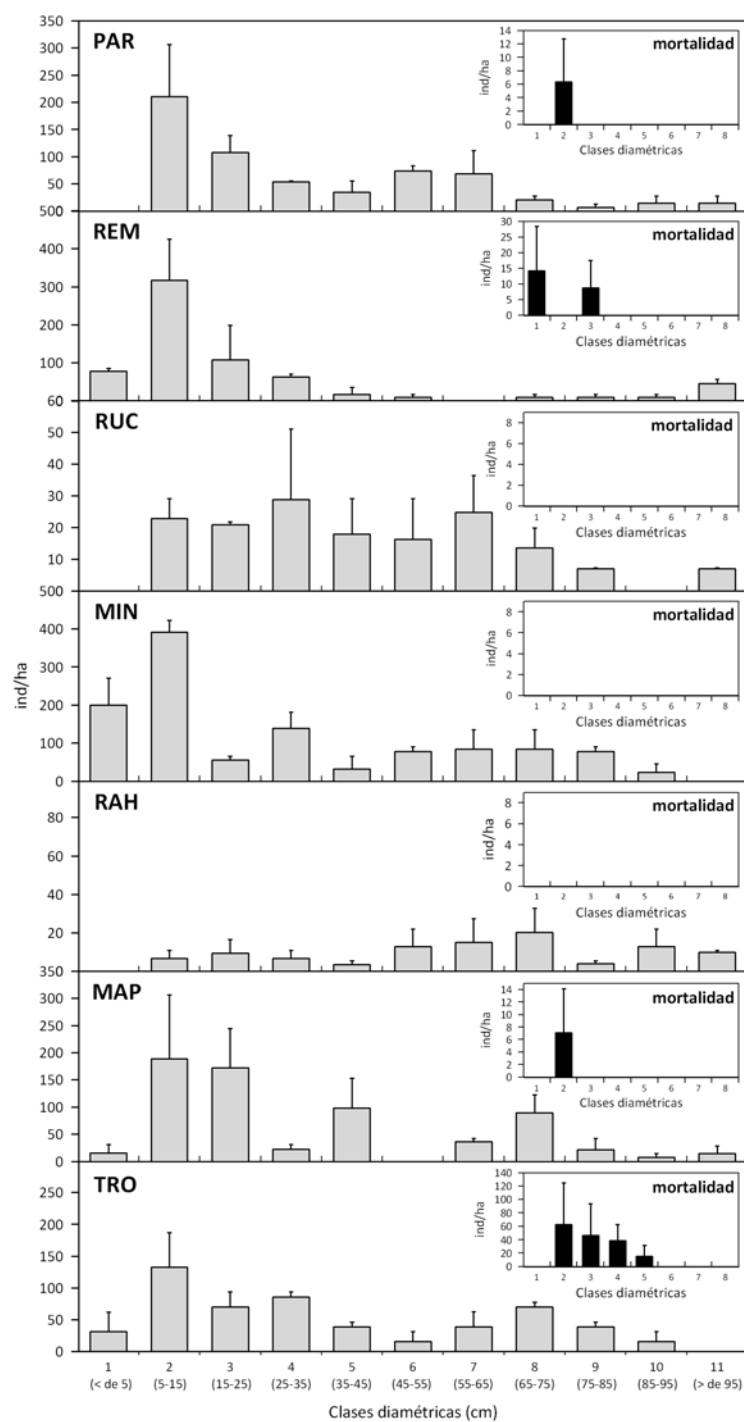
Sitio	Año de incendio	Número de cicatrices	Número de árboles registradores	% de árboles registradores	Intervalo de fuego
PIN	1894	2	8	25	23
	1904	4	11	36	10
	1907	2	11	18	3
	1912	1	12	8	5
	1962	1	13	8	50
	1967	1	14	7	5
RAH	1811	1	1	100	.
	1836	1	1	100	25
	1855	1	2	50	19
	1891	7	8	88	36
	1897	1	9	11	6
	1902	1	10	10	5
	1906	1	10	10	4
	1908	1	10	10	2
	1909	5	13	38	1
	1911	1	14	7	2
	1922	1	14	7	11
	1924	1	15	7	2
	1931	1	15	7	7
	1933	2	16	13	2
	1936	3	18	17	3
	1938	1	18	6	2
MAP	1441	1	1	100	.
	1494	1	1	100	53
	1662	1	2	50	168
	1722	2	4	50	60
	1737	1	5	20	15
	1754	1	6	17	17
	1760	2	7	29	6
	1778	1	8	13	18
	1795	1	8	13	17
	1811	1	8	13	16
	1814	1	9	11	3
	1824	2	10	20	10
	1831	1	10	10	7
	1838	2	12	17	7
	1855	1	13	8	17
	1858	1	13	8	3
	1862	3	16	19	4

Sitio	Año de incendio	Número de cicatrices	Número de árboles registradores	% de árboles registradores	Intervalo de fuego
MAP	1870	1	17	6	8
	1873	1	18	6	3
	1875	1	18	6	2
	1882	2	20	10	7
	1884	1	20	5	2
	1887	1	20	5	3
	1894	1	20	5	7
	1897	1	20	5	3
	1905	1	20	5	8
	1909	2	21	10	4
	1915	1	21	5	6
	1928	1	21	5	13
	1931	1	21	5	3
	1935	2	22	9	4
	1956	2	23	9	21
	1973	1	23	4	17
	1992	1	23	4	19
	1995	1	24	4	3
	1999	1	24	4	4
	1944	1	18	6	6
	1946	1	18	6	2
	1953	1	18	6	7
	1962	1	18	6	9
	1963	2	19	11	1
	1969	2	19	11	6
	1974	1	19	5	5
	1980	1	19	5	6
	2003	1	18	6	23
TRO	1762	2	2	100	.
	1774	1	2	50	12
	1808	1	3	33	34
	1824	3	4	75	16
	1831	2	5	40	7
	1850	1	6	17	19
	1852	1	6	17	2
	1855	2	8	25	3
	1886	2	9	22	31
	1901	1	9	11	15
	1906	1	9	11	5

Apéndices

Sitio	Año de incendio	Número de cicatrices	Número de árboles registradores	% de árboles registradores	Intervalo de fuego
TRO	1911	1	9	11	5
	1913	1	9	11	2
	1920	1	10	10	7
	1931	2	10	20	11
	1940	1	11	9	9
	1944	7	16	44	4
	1978	1	16	6	34
	1981	1	16	6	3
	1991	2	16	13	10
	1995	1	16	6	4

APÉNDICE III: DENSIDAD DE INDIVIDUOS (IND/HA) POR CLASES DIAMÉTRICAS POR SITIO
(ver Capítulo 4 por el código de los sitios)



APÉNDICE IV: AÑOS DE LIBERACIONES POR INDIVIDUO ANALIZADO EN CADA SITIO

(ver Capítulo 4 por el código de los sitios)

Sitio	Individuo	Fechas de liberaciones
PAR	PAR101B	1713, 1737, 1822, 1847, 1882, 1902, 1924, 1977
	PAR102	1731, 1768, 1819
	PAR104	1669, 1735, 1774, 1819, 1854, 1898, 1922, 1977
	PAR105B	1680, 1699, 1715, 1780, 1902
	PAR110	1855, 1891, 1913, 1937
	PAR112	1866, 1893, 1952, 1993
	PAR117B	1819, 1850, 1897, 1905, 1930, 1979
	PAR118	1583, 1614, 1627, 1648, 1666, 1682, 1775, 1822, 1838, 1855, 1874, 1909
	PAR204	1737, 1773, 1794, 1885, 1889, 1920, 1934, 1974
	PAR207A	1629, 1648, 1669, 1699, 1739, 1754, 1780, 1786, 1815, 1862, 1897, 1926, 1932, 1974
	PAR209A	1669, 1703, 1755, 1851, 1862, 1880
	PAR212	1792, 1855, 1884, 1902, 1949, 1986
	PAR216	1792, 1851, 1997
	PAR218	1792, 1856, 1884, 1890
	PAR222	1731, 1772, 1795, 1836, 1848, 1903, 1920, 1948
	PAR224	1914, 1939
	PAR229B	1620, 1670, 1705, 1711, 1734, 1897, 1929
	PAR230B	1886, 1934, 1981
REM	REM103	1883, 1894, 1913
	REM107	1984
	REM113	1952
	REM114	1964, 1990
	REM115	1876, 1969
	REM117B	1962
	REM118	1973
	REM122	1962
	REM123B	1962
	REM208	1739, 1793, 1836, 1859, 1897, 1966
	REM210	
	REM211A	
	REM212A	1963
	REM214	
	REM215	1965
	REM217	1828
	REM227	1962, 1981
	REM201	

Sitio	Individuo	Fechas de liberaciones
REM	REM202	1940
	REM203	
	REM204B	
	REM205	
	REM206B	1942
	REM101A	1958
	REM127A	
	REM130	1961, 1995
RUC	RUC101	
	RUC102	1831, 1897
	RUC103B	1830, 1850, 1873, 1897, 1914, 1965
	RUC104C	1826, 1896, 1913
	RUC105	1983
	RUC106B	1830, 1854, 1893
	RUC110B	1915
	RUC111B	1945
	RUC112B	1769, 1790, 1828, 1878, 1894, 1975
	RUC119	
	RUC120	1916
	RUC122	1963
	RUC124	1962, 1982
	RUC125	1957, 1965
	RUC204	1897, 1909, 1915
	RUC205B	1751, 1772, 1789, 1873, 1973
	RUC207B	1758, 1772, 1791, 1814, 1839, 1872, 1897
	RUC208	1902, 1917
	RUC209	1872, 1918
	RUC210	1773, 1787, 1839, 1872, 1902, 1922
	RUC211	1752, 1836, 1855, 1875
	RUC219A	1835, 1871
	RUC223B	1815, 1830, 1835, 1874
	RUC226	1915
	RUC230	1815, 1854, 1897, 1917, 1965
MIN	MIN101	1759
	MIN102	1724, 1755, 1830
	MIN103	1847, 1866, 1879, 1932
	MIN105	
	MIN108	1779, 1862
	MIN113B	1753, 1931, 1976
	MIN115A	1783, 1813, 1955

Apéndices

Sitio	Individuo	Fechas de liberaciones
MIN	MIN116	1932, 1943
	MIN119	1868, 1938
	MIN127	1719
	MIN129A	1629, 1696, 1733, 1777, 1796, 1827
	MIN130	1708, 1711, 1732, 1736, 1828
	MIN201B	1791, 1813, 1847, 1895
	MIN202	1877
	MIN203	1897
	MIN205	1837, 1856, 1867
	MIN207B	1776, 1791, 1836, 1867, 1891, 1897, 1917
	MIN208	1775, 1792, 1839, 1879, 1897
	MIN213	1919, 1962
	MIN218B	1788, 1808, 1839, 1878, 1920, 1960, 1982
	MIN220	
	MIN223	1831, 1860, 1879, 1920, 1944
	MIN226	
	MIN227	1774, 1944, 1976, 1981
	MIN229	1853, 1897
	MIN230	1981
RAH	RAH106B	1774, 1792, 1851, 1894, 1915
	RAH108	1730, 1744, 1897, 1909, 1983
	RAH110	1730, 1806, 1875, 1897, 1920, 1937
	RAH111	1772, 1787, 1897, 1976
	RAH113	1792, 1822, 1842, 1879, 1898
	RAH115B	1820, 1847, 1875, 1897, 1909, 1975
	RAH116	1909, 1915
	RAH120	1877, 1897, 1909
	RAH122	1761, 1861, 1890, 1897, 1920, 1957
	RAH129	1909
	RAH130	
	RAH203	1893, 1921, 1981
	RAH204	1845, 1976
	RAH206	1853, 1870, 1898, 1916, 1974
	RAH208B	1892, 1912, 1939, 1974
	RAH211A	1851, 1877, 1894, 1915, 1954
	RAH213	1792, 1834, 1875, 1975
	RAH214	1947, 1952, 1969, 1975
	RAH216A	1768, 1802, 1856, 1970
	RAH218	1839, 1897, 1925, 1931, 1939
	RAH221	1755, 1784, 1804, 1856, 1877, 1900, 1922, 1942, 1975

Sitio	Individuo	Fechas de liberaciones
RAH	RAH228	1593, 1660, 1748, 1805, 1844, 1898, 1919, 1961
	RAH230	1836, 1877, 1894, 1952, 1977
MAP	MAP103B	1772, 1790, 1819, 1825, 1842, 1918, 1973
	MAP107	1879, 1934, 1981
	MAP112	1903, 1920, 1949
	MAP114	1919, 1932, 1985
	MAP115	1847, 1900, 1952
	MAP116	1755, 1772, 1797, 1831, 1879, 1920, 1937, 1991
	MAP117B	1920, 1952, 1991
	MAP120	1824, 1897, 1971, 1991
	MAP121	1822, 1897, 1984
	MAP122	1920
	MAP124	1947
	MAP126B	1846, 1897, 1975, 1995
	MAP127B	1783, 1830, 1845, 1867, 1875, 1894, 1898
	MAP128	1827, 1845, 1872, 1897, 1918
	MAP130	1936, 1958
	MAP202	1716, 1723, 1730, 1738, 1827, 1848, 1974
	MAP204	1814, 1846, 1882, 1899, 1917, 1973, 1990
	MAP205	1692, 1793, 1825, 1836, 1878, 1897, 1918, 1967, 1973
	MAP210	1752, 1757, 1791, 1823, 1846, 1924, 1955, 1961, 1968
	MAP213	1991
	MAP214	1847, 1885, 1901, 1962
	MAP215	1897, 1939, 1970, 1989
	MAP217	1993
	MAP218A	1728, 1830
	MAP221	1847, 1969
	MAP222	1969
	MAP225	1689, 1716, 1820, 1893, 1920, 1948, 1968
	MAP227	1822, 1842, 1848, 1894, 1897, 1963
	MAP230B	1713, 1724, 1745, 1823, 1848, 1936
TRO	TRO101	1732, 1751, 1768, 1792, 1829, 1930
	TRO102	1789, 1849, 1871, 1900
	TRO105	1768, 1788, 1812, 1828, 1880, 1898, 1921, 1964
	TRO106	1790, 1843
	TRO108	1751, 1764, 1787, 1826, 1871, 1898, 1945
	TRO109A	1773, 1790, 1892
	TRO114	1827, 1884, 1897, 1925
	TRO116A	1652, 1669, 1792, 1843, 1867
	TRO119	1664, 1678, 1720, 1779

Apéndices

Sitio	Individuo	Fechas de liberaciones
TRO	TRO125	1716, 1751, 1788, 1975
	TRO126	
	TRO129	1863, 1900, 1906, 1946
	TRO204	1913, 1942, 1962
	TRO213	1862, 1937, 1970
	TRO219B	1843
	TRO220	1810, 1840, 1933, 1964, 1983
	TRO221A	1897, 1917
	TRO222	1660, 1691, 1735, 1824, 1860, 1898
	TRO223	1791, 1868, 1898, 1900, 1925
	TRO224	1699, 1713, 1732, 1883, 1917, 1949
	TRO225	1716, 1735, 1867, 1898, 1901, 1970
	TRO228	1717, 1772
	TRO230B	1897, 1920, 1975